



Pro-gradu tutkielma
Geofysiikka

Argo-pojun soveltuvuus hydrografian seurantaan Selkämerellä

Noora Haavisto

Lokakuu 2017

Ohjaaja: FT Laura Tuomi

Tarkastajat: Professori Matti Leppäranta
FT Laura Tuomi

HELSINGIN YLIOPISTO
FYSIIKAN LAITOS

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto

“Eihän meri voi kuivua?”

—Muumipeikko

Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Fysiikan laitos	
Tekijä — Författare — Author			
Noora Haavisto			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Argo-pojjun soveltuvuus hydrografian seurantaan Selkämerellä			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Geofysiikka			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages
Pro-gradu tutkielma		Lokakuu 2017	52 sivua
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Hydrografian seuranta Itämerellä on hoidettu perinteisesti tutkimusaluksilla, joiden operoiminen on kallista ja joilla päästään seurantapisteille tekemään luotauksia vain muutaman kerran vuodessa. Ilmatieteen laitos on vuodesta 2011 testannut ja operoinut automaattisia profiloivia Argo-poijuja Selkämerellä. Poijut tarjoavat uudenlaisen menetelmän hydrografian ja syvien virtausten mittamiseen, mutta Itämeren mataluus ja vähäsuolainen vesi aiheuttavat haasteita niiden operointiin. Tässä tutkielmassa käsitellään Ilmatieteen laitoksen Argo-piijujen viiden ensimmäisen operatiivisen vuoden (2012–2016) profilimittauksia. Tärkeimpiä tutkimuskysymyksiä ovat, mitä poijujen data kertoo Selkämerestä itsenäisenä datasettinä, missä poijut toimivat paremmin suhteessa perinteiseen seurantaan ja missä eivät, ja miten poijuja kannattaisi käyttää osana olemassa olevaa havaintoverkkoa.</p>			
<p>Argo-piijujen datan perusteella lasketut keskimääräiset lämpötilan ja suolaisuuden arvot Selkämerellä olivat lähellä kirjallisuudessa esitettyjä, joskin pohjakerroksen suolaisuus oli noin 0,5 g kg^{−1} matalampi. Tämän arveltiin johtuvan osin siitä, etteivät kaikki profilit ulottuneet pohjaan asti, ja osittain lyhyestä aikasarjasta verrattuna kirjallisuuden klimatologisiin keskiarvoihin. Vuosi 2014 havaittiin poikkeukselliseksi sekä pintalämpötilan että pohjakerroksen suolaisuuden osalta. Korkean suolaisuuden todettiin olevan todennäköisesti merkki varsinaiselta Itämereltä Selkämerelle tulleet tavallista suuremmasta vesimäärästä. Argo-pojut tuottavat profileja vesipatsaan hydrografias- ta huomattavasti tiheämmin, kuin perinteiset seurantamatkat, joten niiden vahvuus on laivaseurantaan verrattuna lyhytaikaisten muutosten seurannassa. Virtauksia on myös mahdollista arvioida Argo-piijujen ajelehtimisnopeuden perusteella. Selkämeren syvänteelle lasketut virtausnopeudet olivat lähellä kirjallisuudessa esitettyjä (1,4–4,8 cm s^{−1}). Virtausnopeudet ovat ennemminkin hydrografiamittausten sivutuote, kun Argo-piijujen käyttötarkoitus, nopeuksien arvioinnissa on paljon virhelähteitä, jotka yhdistettynä matalaan merialueeseen hankaloittavat tulosten tulkintaa.</p>			
<p>Kaiken kaikkiaan Argo-pojut todettiin Selkämerellä toimiviksi merialueen haaseista huolimatta. Poijut tuottavat profilidataa tiheydellä, joka on aiemmin ollut saavuttamattomissa laivaseurannan kalleuden takia. Ensimmäisinä operatiivisina vuosina Selkämeren Argo-pojut ovat tuottaneet syvännealueen profilidatasta jopa 80 % (verrattuna HELCOMin seuranta-asemilla tehtyihin mittauksiin). Tulevaisuudessa olisi kiinnostavaa kokeilla poijujen ohjautumista esimerkiksi Ahvenanmerellä, ja tutkia, miten tällä hetkellä (10/2017) Selkämerellä yhtäaika mittaavat kolme poijuja kuvaavat koko Selkämerta ja olisiko tämä sopiva määrä poijuja yhtäaikaisessa operatiivisessa seurannassa.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
Argo, hydrografia, mittalaite, Selkämeri			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Kumpulan kampuskirjasto			
Muita tietoja — övriga uppgifter — Additional information			

Sisältö

	Sivu
Kuvat	ix
Taulukot	xi
1 Johdanto	1
2 Selkämeri	5
2.1 Geografia ja topografia	5
2.2 Hydrografia	8
2.3 Virtaukset	10
2.4 Ilmastonmuutos	11
3 Argo-pojut	13
3.1 Argo-pojun toimintaperiaate	13
3.2 Argo Itämerellä	15
4 Data ja käsittelymenetelmät	19
4.1 Argo-data	19
4.2 Topografia	20
4.3 Sääasemat ja aaltopoiju	20
4.4 CTD-data	20
4.5 Meriveden tilanmuuttujien laskeminen	21
4.5.1 TEOS-10	21
4.5.2 Happidata	21
4.6 Halokliinin ja termokliinin laskutapa	21
4.6.1 Termokliini	22
4.6.2 Halokliini	22
5 Tulokset	23
5.1 Ajelehtimisreitit	23

5.2	Profiilien vertikaalinen kattavuus	23
5.3	Hydrografia	26
5.3.1	Aikasarjat	26
5.3.2	Vuosien välinen vaihtelu	30
5.4	Ajelehtimisnopeudet	39
5.5	Argo-poijut osana Selkämeren seurantaa	42
6	Yhteenveto	45
	Kiitokset	47
	Kirjallisuus	49

Kuvat

	Sivu
2.1 Selkämeren topografia ja ympäröivät altaat	6
3.1 Argo-poijun rakenne	14
3.2 Argo-poijun toimintasykli	16
5.1 Argo-poijujen ajelehtimisreitit Selkämerellä	24
5.2 Argo-profiilien vertikaalinen kattavuus Selkämerellä	25
5.3 Argo-poijujen vuosina 2012–2016 tekemät luotaukset aikasarjana . . .	29
5.4 Selkämeren pintalämpötila vuosina 2012–2016.	31
5.5 Termokliinin ja halokliinin syvyys Selkämerellä vuosina 2012–2016 .	33
5.6 Selkämeren pintasuolaisuus vuosina 2012–2016.	33
5.7 Selkämeren pintakerroksen keskilämpötila vuosina 2012–2016.	35
5.8 Selkämeren pohjakerroksen keskilämpötila vuosina 2012–2016.	35
5.9 Selkämeren pintakerroksen keskisuolaisuus vuosina 2012–2016.	36
5.10 Selkämeren pohjakerroksen keskisuolaisuus vuosina 2012–2016.	36
5.11 Argo-poijujen ajelehtimissuunnat- ja nopeudet Selkämerellä	40

Taulukot

	Sivu
3.1 Ilmatieteen laitoksen Itämerellä toteuttamat Argo-mittausjaksot vuosina 2012-2016.	17
5.1 Argo-poijujen profilien syvyydet ja niiden vertikaalinen kattavuus eri mittausjaksoilla.	25
5.2 Selkämeren pinta- ja pohjakerroksen lämpötilan kuukausikeskiarvot 2012–2016.	27
5.3 Pinta- ja pohjakerroksen suolaisuuden ja lämpötilan arvoja eri vuosina	38
5.4 Argo-poijujen profilimittausten aikavälit ja ajelehtimisnopeudet Selkämerellä vuosina 2012-2016.	39

1. Johdanto

Itämeren fysikaalisia ominaisuuksia ja niiden muutoksia on seurattu Itämerellä 1800-luvun loppupuolelta, ja alun manuaalisista laivamittauksista on teknologian kehityessä siirrytty yhä tarkempiin ja itsenäisempiin mittalaitteisiin. Seurannan kattavuutta pyritään kasvattamaan esimerkiksi meren tilan seurannan parantamiseksi ja malliennusteiden laadun arvioimiseksi. Mitä tiheämmin mittauksia saadaan, sitä pienemmän skaalan ilmiöitä pystytään tutkimaan niin ajan, kuin paikankin suhteen. Nykyään saatavilla on erilaisia etäohjattavia alustoja, joihin voi kytkeä monenlaisia sensoreita meren ominaisuuksien seuraamiseksi. Tässä tutkielmassa keskitytään yhteen tällaisista laitteista, Argo-poijuihin, joita Ilmatieteen laitoksella on nykyään käytössä Itämerellä.

Ensimmäinen hydrografinen tutkimusmatka Itämerellä tehtiin vuoden 1877 kesällä, ja se kattoi kaikki Itämeren altaat Suomenlahtea ja Riianlahtea lukuunottamatta (F. L. Ekman ja O. Pettersson, 1892; Witting, 1905). Pian tämän jälkeen alettiin seurata myös Itämeren hydrografiassa tapahtuvia muutoksia (Otto Pettersson ja G. Ekman, 1897). Tuolloin kaikki mittaukset tehtiin manuaalisesti mekaanisten noutimien avulla ja esimerkiksi suolaisuus mitattiin vesinäytteistä. Sitten fysiikkaalisessa meritieteessä käyttöön ovat vakiintuneet elektroniset mittalaitteet, kuten suolaisuutta, lämpötilaa ja painetta mittaava CTD¹-luotain. Itämerellä on kymmeniä vakituksia seurantapisteitä, joilla tehdään vuosittain luotauksia moderneilla tutkimusaluksilla, minkä lisäksi järjestetään yksittäisiä tutkimusmatkoja. Lisäksi Itämerelle on asennettu esimerkiksi aallokkoa ja pintalämpötilaa mittaavia poijuja, virtausmittareita, erilaisia koko vesipatsasta mittaavia laitesarjoja sekä säännöllistä reittiä kulkeviin laivoihin asennettuja antureita. Kaukokartoitus on nykyään myös olennainen osa meren pintakerroksen seurantaa, ja merimallit ovat yhä tärkeämpi työkalu koko Itämeren tutkimuksen kannalta. Kerätyn datan aika- ja paikkaresoluutio on paljon alkuaikojaa parempi, mutta tutkimusristeilyt ovat kalliita ja niidenkään tiheys ei riitä kattamaan nopeampiskaalaisen dynamiikan, kuten altaiden välisen vedenvaihdon, vakituista seurantaa.

¹Conductivity, Temperature, Depth

Viime vuosina merentutkimuksessa on otettu käyttöön erilaisia autonomisia vedenalaisia mittalaitteita (autonomous underwater vehicle, AUV), joita ohjataan satelliittiyhteyden kautta. Tärkeimpiä AUV:ita, jotka mittaavat koko vesipatsaan ominaisuuksia, ovat Argo-pojut ja Liitimet. Argo-pojut kehitettiin 1990-luvulla ja niitä on nykyään maailman merillä käytössä lähes 4000 Argo-ohjelman puitteissa. Liitimet otettiin käyttöön 2000-luvun alussa. Molempien laitteiden etu on niiden kyky liikkua vesipatsaassa tiheyttään muuttamalla, jolloin ne voivat tehdä profiilimittauksia laitteen operoijan ohjelmoimilla syvyyksillä ja aikatauluilla. Liitimille voi lisäksi ohjelmoida kuljettavan reitin, kun taas Argo-pojut ajelehtivat merivirtaus-ten mukana. Laitteiden energiaa säästävä sukellusmekanismi ja kauko-ohjattavuus tekevät niistä edullisen täydentäjän laivoista tehtäville profiilimittauksille etenkin kaukaisilla merialueilla.

Uutta mittaustekniikkaa merentutkimukseen kehitetään jatkuvasti, mutta useimmiten laitteet suunnitellaan valtameren olosuhteisiin. Myös Argo-poijuja oli käytetty vain syvillä merialueilla kaukana rannikosta, kun Ilmatieteen laitos alkoi operoimaan poijuja Itämerellä 2011. Itämeri poikkeaa valtameristä huomattavasti kooltaan, syvyydeltään ja veden lämpö- ja suolaisuusolosuhteiltaan, joten Argo-poijujen käytössä Itämerellä on omat haasteensa (Purokoski et al., 2013). Ilmatieteen laitos käyttää nykyään Argo-poijuja jatkuvasti Selkämerellä ja Gotlannin syvänteellä.

Argo-poijujen datalle Itämereltä on monia käyttötarkoituksia. Westerlund ja Tuomi, (2016) käyttivät profiilidataa mallin validoinnissa, jossa perinteiset seurantapisteen CTD-profiilit olisivat olleet liian harvassa lyhytaikaisen tuulen sekoituksen havaitsemiseksi. Itämerellä Argo-pojut on asetettu mittaamaan profileja valtameripoijuja tiuhempaan. Profiiliväliä voi vielä tihentää esimerkiksi mielenkiintoisen sääilmiön, kuten myrskyn, kulkiessa poijun läheltä. Tällöin saadaan informaatiota, joka ei tavallisella tutkimusaluksella olisi sääolosuhteiden takia mahdollista mitata. Poijujen pysyessä samoilla alueilla myös hydrografiassa tapahtuvien paikallisten muutosten seuranta on mahdollista, ja pinnan läheltä mitattuja arvoja voidaan mahdollisesti käyttää esimerkiksi pintalämpötilan kaukokartoitusdatan täydentämiseen pilvisiltä alueilta. Ajelehtimisreitillä avulla voidaan puolestaan laskea virtausnopeuksia poijun ajelehtimissyvytydessä. Poijujen pohjaan osuminen ja hyvin rajattu vaikutusmahdollisuus ajelehtimisreittiin vaikeuttavat näitä käyttötarkoituksia.

Itämeren ominaisuuksien seuranta on tärkeää, sillä sen valuma-alueella ja rannoilla asuu yli 80 miljoonaa ihmistä. Lähimeremme vaikuttaa meidän kaikkien elämään, joko suoraan tai välillisesti merenkulun, merenkäynnin ja paikallisen ilmaston sekä meren antimien kautta. Ihminen myös vaikuttaa Itämeren tilaan: me-

renkulku ja asutuksesta sekä viljelystä aiheutuva ravinteiden ja saasteiden valunta muokkaavat merkittävästi Itämeren ekosysteemiä. Ravinnekuormitus aiheuttaa rehevöitymistä ja ympäristömyrkyt, kuten raskasmetallit, päätyvät kalojen kautta ihmisravinnoksi. Luonnollisen ilmasto-olojen vaihtelun lisäksi ihmistoiminnan kiihdyttämä ilmastomuutos vaikuttaa Itämeren fysikaalisiin ominaisuuksiin sekä tuuliolosuhteisiin ja niiden muutoksiin. Muutokset vuosittaisen merijään laajuudessa ja kantavuudessa vaikuttavat suoraan merenkulkuun ja jääteiden ylläpitoon. Näiden ominaisuuksien ja muutosten seuranta on siis tärkeää, jotta voimme sekä suojella että parantaa Itämeren tilaa sen itsensä takia, sekä huolehtia nauttimiemme meren hyötyjen jatkuvuudesta.

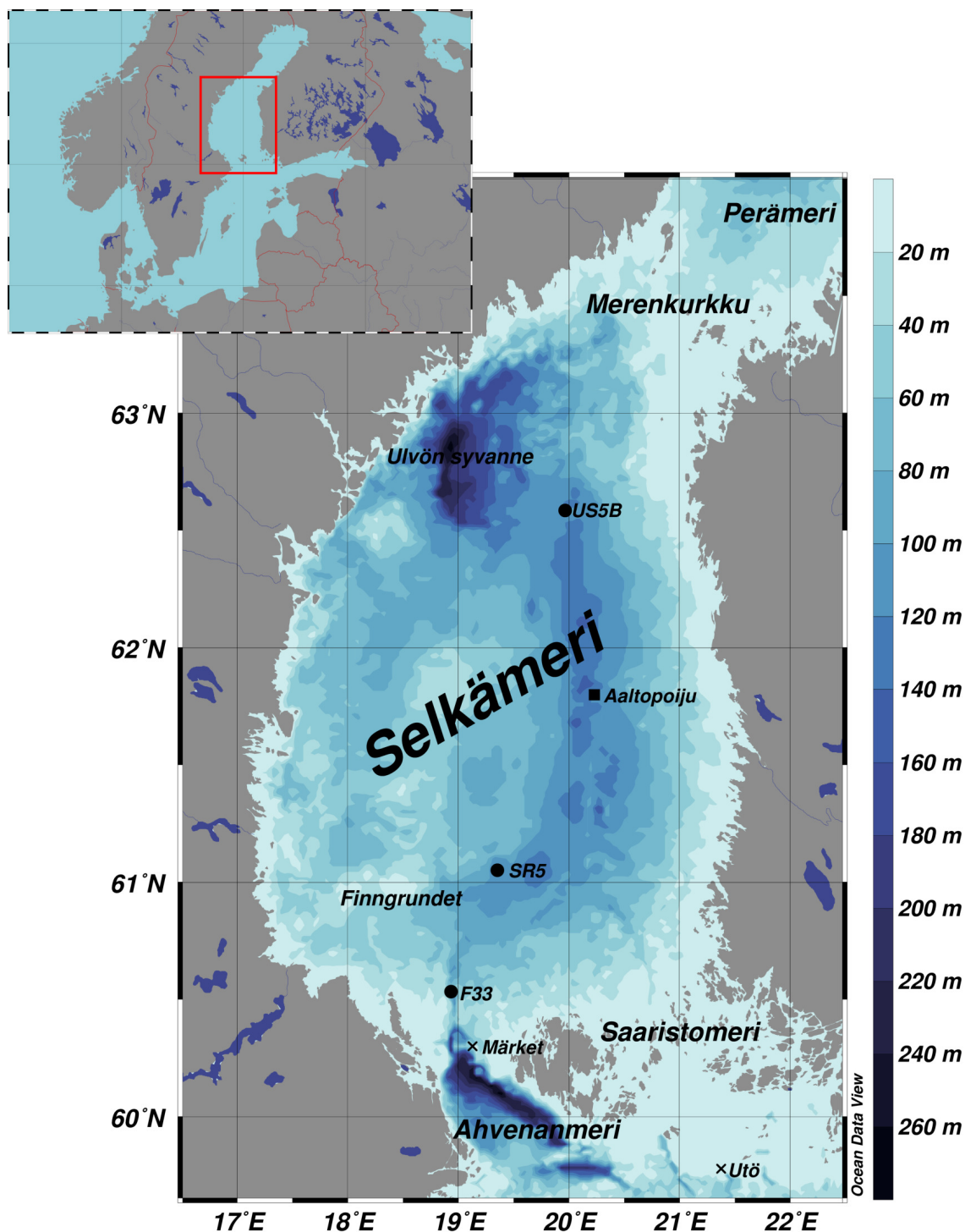
Tässä tutkielmassa esitellään Selkämeri Argo-poijujen käyttöalueena, käydään läpi Argo-poijun toimintaperiaate ja tarkastellaan Argo-poijujen mittauksia Selkämerellä sekä niiden soveltuvuutta hydrografian seurantaan. Tärkeitä kysymyksiä ovat, mitä kaikkea Argo-datan perusteella voidaan ylipäänsä seurata, mitä pelkän Argo-datan perusteella voidaan sanoa Selkämeren tilasta, missä poijut toimivat perinteistä seurantaa paremmin ja missä huonommin, mitä haasteita Argo-poijujen käytössä on Selkämerellä, millaisia seurantamatkoilta mahdollisesti huomaamatta jääneitä ilmiöitä Argo-datassa näkyy sekä miten Argo poijut parhaiten toimisivat vakiintuneiden seurantamenetelmien rinnalla ja täydentäjänä.

2. Selkämeri

Selkämeri on Itämeren toiseksi pohjoisin allas ja osa Pohjanlahtea, joka on Suomen ja Ruotsin välinen merialue. Pohjanlahti jaetaan yleisesti neljään osaan (esim. Marmefelt ja Omstedt, (1993)): Selkämeri, Perämeri, Ahvenanmeri ja Saaristomeri. Selkämeri on näistä sekä pinta-alaltaan että tilavuudeltaan suurin. Laivaliikenne alueella on runsasta ja Selkämeren 230 000 km²:n valuma-alueella (Bergström ja Carlsson, 1994) asuu yli 2 miljoonaa ihmistä, joista noin 1,3 miljoonaa rannikolla (Backer ja Frias, 2013). Ihmistoiminnan aiheuttamasta kuormituksesta huolimatta Selkämeren tila on tähän asti pysynyt hyvänä varsinaisesta Itämerestä poiketen, mutta varoittavia merkkejä ravinnekuormituksen vaikutuksista pohjan happipitoisuuden laskuun on havaittu (Ambjörn et al., 1981; Raateoja, 2013). Tässä luvussa käydään läpi Selkämeren ominaisuuksia topografian, hydrografian ja virtausten kannalta ja niiden vaikutusta Selkämeren tilaan.

2.1 Geografia ja topografia

Selkämeren rajaavat kartalla pohjois-etelä-suunnassa leveyspiirit 60,5 N ja 63,5 N ja itä-länsi-suunnassa pituuspiirit 17 E ja 21,5 E (kuva 2.1). Maantieteellisesti se on selkeärajainen merialue, joka on idässä ja lännessä Suomen ja Ruotsin rannikoiden rajaama ja rajoittuu pohjoisessa ja etelässä vedenalaisiin kynnyksiin. Altaiden välinen kynnyssyvyys on syvin kohta, josta vesi pääsee vaihtumaan altaiden välillä. Kynnyksen syvyys siis vaikuttaa merkittävästi altaiden vesimassojen sekoittumiseen siten kunkin altaan vesipatsaan ominaisuuksiin. Pohjanlahden altaiden välisten kynnysten syvimät kohdat ovat kapeita ja muuten altaiden väliset reunat huomattavasti matalampia (kuva 2.1). Ahvenanmeri ja Saaristomeri erottavat Selkämeren varsinaisesta Itämerestä. Sekä Ahvenanmeren ja varsinaisen Itämeren, että Selkämeren ja Ahvenanmeren välinen kynnyssyvyys on kirjallisuudessa useimmiten noin 70 metriä (Håkansson et al., 1996). Ahvenanmeren ja Selkämeren välisestä kynnyssyvyydestä on useita tulkintoja; Hietala et al., (2007) ilmoittivat Ahvenanmeren ja Selkämeren väliseksi kynnyssyvyydeksi 92 m ja Fonselius, (1996) mainitsi useita 150 m syviä



Kuva 2.1: Selkämeren topografia ja ympäröivät altaat. Vasemmassa yläkulmassa on kuvattu Selkämeren sijainti Itämerellä. Kuvaan merkityt ympyrät näyttävät tärkeiden seurantapisteiden sijainnit, neliö Selkämeren aaltopoijun sijainnin ja raksit tutkielmassa käytettyjen sääasemien sijainnit. Kartta on piirretty Ocean Data View (ODV) -ohjelmalla (Schlitzer, 2016). Pohjatopografia on ODV:n odv0P_coast_Regional2-paketista.

merialueita kanavia. Selkämeren vesimassan kannalta olennaisin on kuitenkin Ahvenanmeren ja varsinaisen Itämeren välinen kynnyks. Ahvenanmerestä itään sijaitseva Saaristomeri puolestaan on keskisyvyydeltään matala, vain 19 metriä. Sitä kuitenkin halkoo kolme pohjois-etelä-suuntaista 30-40 m syvää siirroslinjaa, joiden kautta vedenvaihto Saaristomeren läpi Selkämerelle tapahtuu (Fonselius, 1996). Saaristomeren kautta kulkeutuvan veden osuus Selkämeren vedenvaihdosta varsinainen Itämeren kanssa on arvioitu olevan noin 20-30% (Ambjörn et al., 1981). Pohjoisessa Selkämeren ja Perämeren väliin jää Merenkurkku, jonka kynnysyvyys on Ruotsin edustalla noin 25 metriä.

Selkämeren pinta-ala on Fonselius, (1996) mukaan $64\,886\text{ km}^2$ ja sen tilavuus on 4308 km^3 . Näistä luvuista on kirjallisuudessa erilaisia versioita, esimerkiksi Voipio, (1981) esittää pinta-alalle ja tilavuudelle hieman suurempia arvoja. Nämä erot johtuvat luultavasti Pohjanlahden merialueiden erilaisesta rajaamisesta sekä käytetyn datan resoluutiosta. Selkämeri on Pohjanlahden merialueista laajin ja tilavuudeltaan suurin. Sen keskisyvyys on 66 metriä, mikä on syvempi kuin Itämeren keskisyvyys (54 m). Selkämeri ei kuitenkaan ole tasaisen syvä, vaan sitä halkoo Suomen rannikkoa mukaillen noin 60 km leveä ja 100-150 metriä syvä kaarimainen syväne. Se alkaa Finngrundetin matalikon itäpuolelta ja kiertää ensin koilliseen ja päättyy Selkämeren luoteisreunaan Ruotsin rannikolle. Syvän alueen luoteispäässä sijaitsee Ulvön syväne, joka on merikorteissa 293 metriä syvä ja Pohjanlahden toiseksi syvin kohta Ahvenanmeren syvänteen jälkeen. Fonselius, (1996) kuitenkin totesi ruotsalaisten hydrografisten tutkimusmatkojen löytäneen vain 250 metriä syvää vettä ja osassa kirjallisuudesta Selkämeren maksimisyvyudeksi on kerrottu 280 m (Green et al., 2006; Mälkki ja Tamsalu, 1985). Ruotsin puolella Selkämeri on paljon matalampi, noin 20-80 m, ja lähellä rantaa pohja syvenee nopeasti, toisin kuin Suomen puolella, missä merenpohja viettää loivasti kohti syvänettä.

Selkämeren syvyys ja yhteydet ympäröiviin merialueisiin muuttuvat maankuoren kohoamisen myötä. Maanpinta kohoaa koko Itämeren alueella viimeisimmän Veiksel-jääkauden jäljiltä mannerjäätikön painolastin poistuttua maankuorta painamasta. Selkämeren alueella nopeinta nousu on merenkurkussa, noin 9 mm vuodessa laskien kohti etelää. Itämeren alueen eniten noussut alue, Korkea Rannikko, sijaitsee Selkämeren luoteisrannalla. Ahvenanmeren kohdalla nousu on enää 5 mm vuodessa. Tätä nousua kompensoi merenpinnan nousu, mutta toistaiseksi Selkämerellä maanpinta kohoaa merenpintaa nopeammin. Tällä hyvin hitaalla muutoksella ei lyhyellä aikavälillä ole merkitystä hydrografian seurannalle, mutta Merenkurkku madaltuu koko ajan ja sen on arvioitu sulkeutuvan noin 2000 vuoden päästä (Johansson, 2009). Tämä saattaa vaikuttaa myös Selkämeren hydrografiaan jo pal-

jon aiemmin kynnyssyvyyden madaltuessa, mikäli vedenvaihto Perämeren kanssa muuttuu, joskin Merenkurkun läpi Selkämerelle virtaava vesi on makeaa pinnassa virtaavaa vettä.

2.2 Hydrografia

Selkämeren hydrografia eroaa muista Itämeren altaista huomattavasti. Tämä johtuu kynnyksistä ja matalasta Saaristomerestä, jotka rajoittavat vedenvaihtoa varsinaisen Itämeren kanssa, sekä suuresta makean veden valunnasta (noin 90-110 km³ vuodessa (Bergström ja Carlsson, 1994; Green et al., 2006)) ja kuljetuksesta Perämereltä. Kuten muukin Itämeri, Selkämeri on laajan valuma-alueen ja runsaan jokivaluman takia murtovesiallas, eli sen veden jäätympiste on tiheysmaksimin lämpötilaa alhaisempi (Leppäranta ja Myrberg, 2009). Tästä, ja pohjoisesta sijainnistaan johtuen Selkämerellä tapahtuu syksyisin ja keväisin vesipatsaan täyskierto halokliiniin asti ja ainakin osa Selkämerestä jäätyy joka talvi. Nämä ilmiöt vaikuttavat merkittävästi meren hydrografiaan.

Selkämeren kerrostuneisuus on varsinaista Itämerta heikompi ja vaihteleva (Väli et al., 2013), mutta silti merkittävä hydrografian kannalta. Keskimäärin 60-70 metrin syvyydessä sijaitseva halokliini jakaa vesipatsaan kahteen osaan, pintakerrokseen ja pohjakerrokseen, ja estää näiden kerrosten vesimassojen sekoittumisen (esim. Mälkki, (1981)), joskin sitä on toisinaan vaikea havaita yksittäisestä suolaisuuden pystyprofilista. Halokliinin syvyys Selkämeren syvällä alueella vaihtelee vuodenaikojen mukaan 50-80 metrin välillä siten, että halokliini on syvimmillään kevättälvellä ja matalimmillaan syksyllä (Meier, 2007).

Halokliinin yläpuolisessa pintakerroksessa vesimassan ominaisuuksia dominoi runsas makean veden valunta, ja kesällä pintakerroksen yläosaan muodostuu noin 15 m syvä sekoituskerros, joka on eristetty alapuolisesta vanhan talviveden kerroksesta termokliinilla (Håkansson et al., 1996). Termokliinin läsnäollessa ilmakehän ja meren vuorovaikutus on rajoittunut tähän sekoituskerrokseen. Selkämeren pintaveden suolaisuus kasvaa pohjoisesta etelään välillä keskimäärin 4,8 g kg⁻¹:sta 6,0 g kg⁻¹:een siten, että valunnan aiheuttama makeamman veden alue jatkuu Merenkurkusta kaapeana Ruotsin rannikkoa pitkin, ja etelästä kulkeutuva suolaisempi vesi pysyttelee keskemmällä, mutta lähempänä Suomen rannikkoa (Leppäranta ja Myrberg, 2009). Pintasuolaisuudessa vallitsee siis keskimäärin gradientti Ruotsin Rannikolta Suomeen (Marmefelt ja Omstedt, 1993). Suolaisin pintavesi ei ulotu aivan Suomen rannikolle maalta tulevan valunnan takia. Valunnan lisäksi pintasuolaisuuden jakautumaan vaikuttaa myös keskimääräinen virtauskenttä (kappale 2.3).

Halokliinin alapuolisen pohjakerroksen vesi taas muodostuu Ahvenanmeren ja Saaristomeren ja varsinaisen Itämeren välisten kynnysten yli virtaavasta vedestä. Varsinaisen Itämeren halokliini vaihtelee 60-80 metrin välillä, mikä on samaa luokkaa kuin Ahvenanmeren kynnyksen syvyys (Moller ja Hansen, 1994), joten Selkämerelle saapuva vesi on pääosin peräisin varsinaisen Itämeren pintakerroksesta. Tämä vesi on Selkämeren pintakerroksen vettä tiheämpää ja vajoaa halokliinin alle muodostaen syvää vettä (Hietala et al., 2007; Håkansson et al., 1996; Marmefelt ja Omstedt, 1993). Varsinaisen Itämeren halokliinin alapuolisen veden työntymistä kynnyksen yli tapahtuu myös. Selkämeren pohjakerroksen suolaisuus vaihtelee välillä 6,4–7,2 g kg⁻¹ (Leppäranta ja Myrberg, 2009).

Vuodenaikaisvaihtelulla on suuri merkitys Selkämeren hydrografiaan. Keväisin jäiden lähdettyä koko pintakerros on lähestulkoon homogeeninen. Pintaveden lämmetessä se muuttuu ensin raskaammaksi aiheuttaen pystykiertoa. Tiheysmaksimin lämpötilan ohitettuaan pintakerrokseen alkaa muodostua termokliini, jonka alle jää kylmempää vettä menneeltä talvelta, nk. vanha talvivesi eli dikoterminen kerros. Sekoituseros syvenee ja termokliini voimistuu kesän edetessä, kunnes ilmat alkavat viiletä. Kesällä Selkämeren pintaveden lämpötila on keskimäärin noin 13–15 °C (Leppäranta ja Myrberg, 2009). Syksyllä termokliini vähitellen syvenee ja heikentyy veden kylmetessä ja syksyn kovenevien tuulten sekoittaessa pintakerrosta entistä syvemmälle. Kun pintavesi saavuttaa tiheysmaksimin lämpötilan, pääsee koko vesipatsas halokliiniin asti sekoittumaan. Selkämerellä tiheysmaksimin lämpötila on noin 2,8 °C laskettuna IOC et al., (2010) mukaan pintakerroksen keskimääräiselle suolaisuudelle 5,4 g kg⁻¹ (Fonselius, 1996). Tämän jälkeen pintaveden jäähtyessä sen tiheys pienenee ja se jää pinnalle kunnes veden pinta jäätyy noin -0,3 °C:ssa. Pohjan lähellä veden lämpötila on yleensä noin 3–6 °C (Leppäranta ja Myrberg, 2009).

Merenkurkku ja Selkämeren Suomenpuoleinen rannikko jäätyvät joka talvi, kun taas Selkämeren Ruotsinpuoleinen rannikko ja Saaristomeri noin 90-100 % todennäköisyydellä. Selkämeren keskustassa jäätä on tilastojen mukaan 75-90 % talvista ja jään maksimilaajuus saavutetaan yleensä helmikuussa. Keskimäärin Selkämeri jäätyy rannoilta keskustaa kohti 21.12.-11.2. ja jäiden lähtö tapahtuu eletästä pohjoista kohti Suomen rannikko edellä noin. 5.4.-1.5 (SMHI ja FIMR, 1982).

Vuosittainen halokliinin yläpuolisen vesimassan sekoittuminen ja pohjakerroksen veden nopeampi uusiutuminen varsinaiselta Itämereltä advektoituvalla pintavedellä mahdollistavat Selkämerelle varsinaista Itämerta paremmat pohjan happiolot. Selkämeren ja varsinaisen Itämeren väliset kynnykset estävät varsinaisen Itämeren hapettoman veden pääsyn Selkämerelle. Veden maksimi-ikä Selkämerellä on mallitulosten perusteella halokliinin kohdalla noin 4,2 vuotta, kun taas varsinaisella Itä-

merellä se voi olla jopa noin 10 vuotta (Meier, 2005). Selkämeren pohjalla veden iäksi on itse asiassa arvioitu vähemmän, kuin halokliinin kohdilla, noin 3,8 vuotta, kun varsinaisella Itämerellä pohjallakin vesi on mallituloksissa noin 10 vuotta vanhaa (Meier, 2005). Tämäkin viittaa Selkämeren pohjan tuulettumiseen. Selkämeri on kuitenkin altis rehevöitymiselle, ja esimerkiksi muutokset ilmastopakotteessa tai kerrostuneisuudessa voivat huonontaa altaan tilaa, kuten myös mahdollinen varsinaisen Itämeren halokliinin alapuolisen veden pääseminen Selkämerelle. On havaittu, että pohjan happitilanne seuraa pohjan vesimassan tiheyttä noin kahden vuoden viiveellä happipitoisuuden laskun seurattessa tiheyden nousua (Raateoja, 2013). Muutokset esimerkiksi makean veden valunnan tai varsinaiselta Itämereltä advektoituvan veden määrissä voivat siis aiheuttaa muutoksia myös Selkämeren pohjan happitilanteeseen.

2.3 Virtaukset

Lehmann ja Hinrichsen, (2000) ja Myberg ja Andrejev, (2006) mukaan Selkämeren pinnassa rannikolla vallitsee keskimäärin heikko sykloninen virtaus altaan ympäri, kun taas avomerellä keskimääräinen virtaus on itä- tai koillissuuntaista. Tuulet ovat pääasiallinen Selkämeren virtauksia ylläpitävä pakote. Runsaan valunnan ja suolaisuuden aiheuttaman pohjois-eteläsuuntaisen tiheysgradientin takia Selkämeren pinta on Merenkurkussa noin 5–10 cm korkeammalla kuin Ahvenanmeren suulla (Lehmann ja Hinrichsen, 2000), mikä osaltaan ylläpitää virtauksia. Maalta ja Perämereltä kulkeutuva makea vesi ajelehtii pintavedessä kohti Ahvenanmerta, mistä vuorostaan virtaa kynnysten yli tiheää suolaista vettä Selkämeren pohjaa pitkin (Hietala et al., 2007). Selkämeri on tarpeeksi laaja, jotta Maapallon pyörimisen aiheuttama Coriolis-efekti kääntää virtauksia, ja tämä yhdessä tuulten ja topografian kanssa saavat aikaan keskimääräisen syklonisen kierron. Avomerellä itä- ja koillissuuntaiset virtaukset taas johtuvat vallitsevien länsi- ja lounaistuulten aiheuttamasta Ekman-kuljetuksesta. Vallitsevan itään suuntautuvan virtauksen takia Selkämeren Suomen puoleinen rannikko on keskimäärin veden painumisalue. Sekä Suomen että Ruotsin rannikolla esiintyy myös voimakkaampia syvyyden samantyyppisiä seuraavia rannikkovirtauksia, Suomen rannikolla pohjoiseen ja Ruotsin rannikolla etelään. Virtausnopeudet avomerellä ovat noin $2\text{--}4\text{ cm s}^{-1}$ ja rannan lähellä $5\text{--}7\text{ cm s}^{-1}$. Noin 2,5–7,5 metrin syvyydessä virtausnopeudet ovat heikompia ($1\text{--}2\text{ cm s}^{-1}$) ja selkeää virtaussuuntaa on hankala hahmottaa muualla, kuin Suomen rannikolla, missä pohjoiseen suuntautuvat virtaukset ovat selkeämpiä kuin lähellä pintaa, nopeudeltaan $4\text{--}6\text{ cm s}^{-1}$.

2.4 Ilmastonmuutos

BACC II kirjoittajat, (2015) arvioi ilmaston lämmitessä myös Itämeren pintaveden lämpenevän, ja Selkämeren pintalämpötilan odotetaan nousevan Itämeren alueella eniten, jopa 4°C vuosisadassa. Ainakin osa tästä lämpenemisestä johtuisi merijään vuosittaisen pinta-alan pienemisestä aiheutuvasta albedon pienenemisestä. Pintakerroksen odotetaan lämpenevän halokliinin alapuolista pohjakerrosta enemmän. Suolaisuuden taas ennustetaan laskevan koko Itämerellä, mutta vähiten Pohjanlahdella Selkämeren arvioidun suolaisuuden laskun ollessa $-1,5 \text{ g kg}^{-1}$ sadassa vuodessa.

Suolaisuuden arvioidaan laskevan sadannan ja sitä kautta valunnan lisääntymisen seurauksena, mutta sadannan arvioinnissa on paljon epävarmuutta. Kasvava valunta voimistaisi kerrostuneisuutta heikosti kerrostuneella Selkämerellä. Toisaalta nouseva pintalämpötila saattaa vahvistaa kesäistä termokliinia, mikä taas heikentäisi sen alapuolisen vesimassan sekoittumista tuulen vaikutuksesta. Tuuliolosuhteiden muutokset voivat myös vaikuttaa huomattavasti esimerkiksi Selkämeren vedenvaihtoon ja sekoittumiseen, mutta muutosten arvioiminen on hankalaa (BACC II kirjoittajat, 2015).

Merenpinnan arvioidaan nousevan vuosisadan loppuun mennessä noin 0,5 metriä ilmaston lämpenemisen seurauksena, minkä Meier et al., (2017) ja Moller ja Hansen, (1994) ennustavat lisäävän suolaisen veden virtausta Itämereen. Tämän puolestaan ennustetaan lisäävän pohjan hapettomuutta kerrostuneisuuden vahvistumisen kautta, joskin vähän 0,5 metrin merenpinnan nousulla. Yli metrin merenpinnan nousulla Meier et al., (2017) ennustavat kuitenkin 19 % nousua varsinaisen Itämeren pohjan suolaisuuteen, ja tämän vaikutukset saattavat näkyä myös Selkämerellä.

3. Argo-pojut

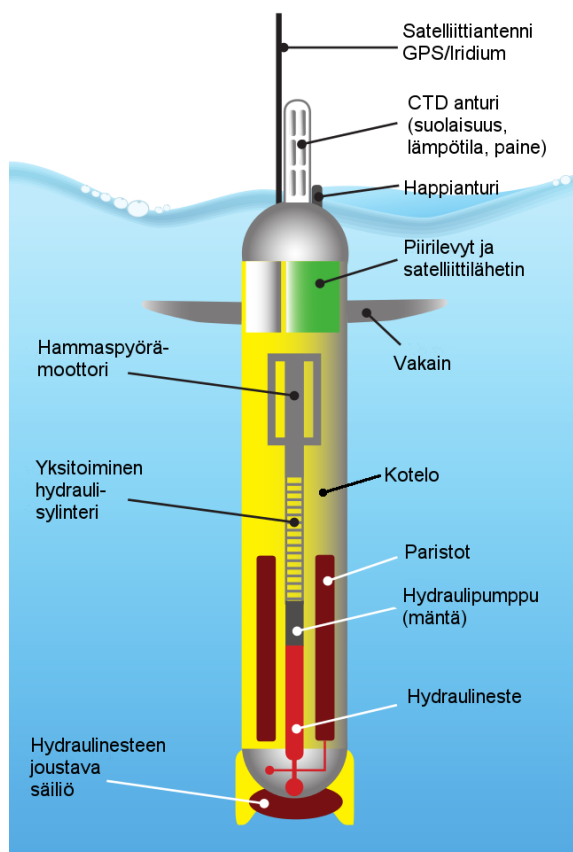
Argo-pojut ovat kohtalaisen uusi ja kustannustehokas väline merten hydrografian seurantaan. Niiden energiaa säästävä sukellusmekanismi ja kommunikaatio satelliittiyhteyden välityksellä mahdollistavat pitkät itsenäiset mittausjaksot kaukana laitteen operoijasta. Tässä kappaleessa esitellään Argo-pojujen toimintaperiaate ja niiden käyttöhistoria maailmalla ja Itämerellä sekä Itämeren Argo-toimintaan liittyviä haasteita.

Vuonna 1999 käynnistetty Argo-ohjelma kattaa lähes 4000 maailman merillä ajelehtivaa Argo-pojua. Poijut mittaavat meriveden lämpötilan ja suolaisuuden, ja jotkin laitteet myös happipitoisuuden sekä erilaisten biologisten indikaattorien, vertikaaliprofiileja itsenäisesti sukellussyvyyttään muuttamalla. Poijut lähettävät kerätyn datan jokaisen profiilin jälkeen satelliitin välityksellä, joten data on lähes reaaliaikaista ja lisäksi kaikkien vapaasti saatavilla (<http://www.coriolis.eu.org/Data-Products/Data-Delivery>). Koska poijut toimivat itsenäisesti ja ne ovat kustannustehokas tapa saada tietoa kaukaisistakin merialueista, niitä on levitetty melko tasaisesti maailman merille. Argo-poijuja käytetään lähtökohtaisesti valtamerillä syvissä vesissä ja kaukana rannikoista, ja dataa on käytetty seurannasta mallien kehitykseen ja opetukseen (Roemmich et al., 2009). Vuodesta 2011 asti Ilmatieteen laitos on testannut, kehittänyt ja operoinut poijuja myös Itämerellä. Lisätietoa Argo-ohjelmasta löytyy osoitteesta <http://www.argo.ucsd.edu/>.

3.1 Argo-pojun toimintaperiaate

Argo-pojun toiminta perustuu energiatehokkaaseen sukellussyvyyden muuttamiseen laitteen tiheyttä säätämällä. Tämä onnistuu joustavan säiliön, nk. uimarakon, avulla. Säiliössä on kaksi osaa, yksi öljylle ja yksi ilmalle. Argo-pojun kotelon sisällä on öljyä, jota tarpeen mukaan pumpataan hydraulipumpulla kotelon ulkoiseen säiliöön tai sieltä takaisin. Pumpattaessa öljyä kotelon sisältä ulkoiseen säiliöön poijun tiheys pienenee, sillä sen tilavuus kasvaa massan muuttumatta. Kun poijun tiheys laskee alle ympäröivän veden tiheyden ja se nousee vesipatsaassa. Vastaavasti kun

joustava säiliö tyhjennetään takaisin poijun kotelon sisään, poijun tiheys kasvaa ja se lähtee vajoamaan, kunnes ympäröivän veden tiheys vastaa poijun tiheyttä. Ilma-säiliöön pumpataan ilmaa poijun kotelon sisältä vain poijun ollessa pinnalla, jotta sen antenni pysyisi vedenpinnan yläpuolella.



Kuva 3.1: Tyypillisen Argo-pojjun osat. Mallista riippuen pojussa voi olla myös useampia sensoreita ja osien paikat ja koko saattavat vaihdella. Kuva on mukailtu Ilmatieteen laitoksen infografiikasta.

oikein on Argo-pojjun sukelluksen kannalta tärkeää, sillä se tarkistaa ympäröivää paineesta sukellussyvyytensä ja korjaa sen mukaan tiheyttään. Poijuihin voidaan CTD:n lisäksi kiinnittää muitakin mittalaitteita, esimerkiksi happianturi, fluorometri, pH-anturi, hiilidioksidimittari ja monia muita.

Argo-pojjun toimintasykli koostuu neljästä vaiheesta: ajalehtiminen, profiilimittaus, datan lähetys ja paluu ajalehtimissyvyyteen. Poiju viettää suurimman osan

Argo-pojjun rakenne ja osat sukellusmekanismista antureihin on esitetty kuvassa 3.1. Osien sijainnit ja muoto vaihtelevat eri laitemallien välillä, mutta kokoonpanon periaate on kaikilla Argo-poijuilla sama. Poijut ovat pitkulaisia, noin puolentoista metrin mittaisia, ja niiden yläpäässä on antenni ja mittalaitteet ja alapäässä hydraulisen joustava säiliö sukeltamista varten. Poijuissa on yleensä myös vakain, joka vaimentaa poijun pystysuuntaista liikettä aallokossa ja siten parantaa satelliittiyhteyden pysyvyyttä. Antenni ottaa yhteyden sekä GPS- että Iridium-satelliitteihin. Tietoliikenne maihin hoiduu Iridium-satelliitin kautta ja poiju paikantaa itsensä GPS-satelliittien avulla.

Kaikissa Argo-poijuissa on mittalaitteista ainakin CTD (Conductivity-Temperature-Depth), joka nimensä mukaisesti mittaa veden sähkönjohtokykyä, lämpötilaa ja painetta. Sähkönjohtokyvystä saadaan laskettua veden käytännöllinen suolaisuus S_P ja paineesta saadaan syvyys. Paineen mittaaminen

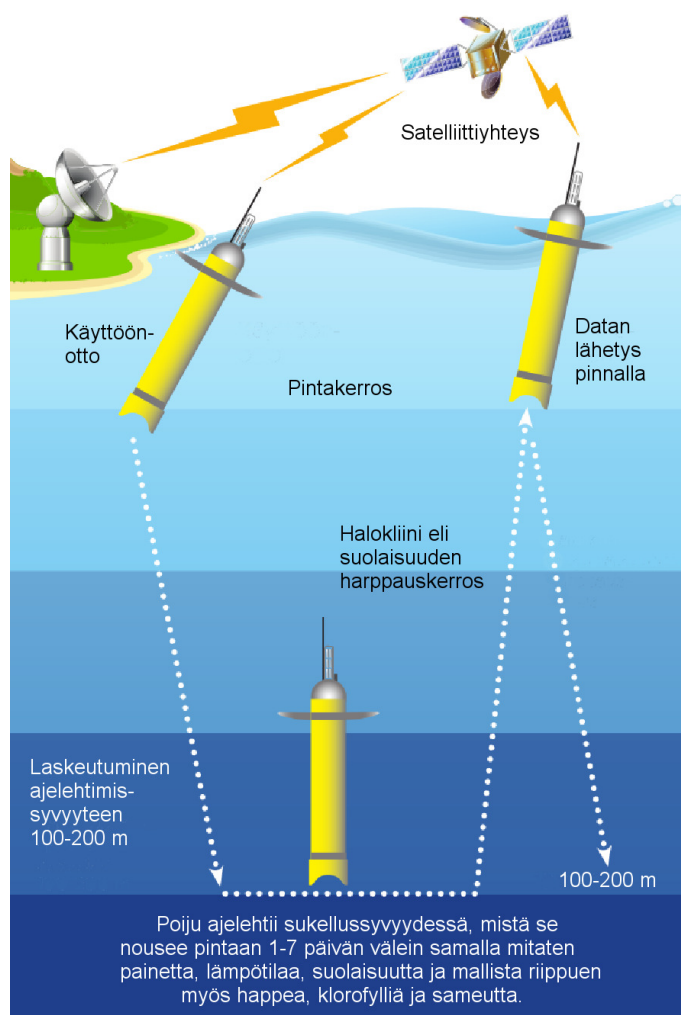
syklistä ajelehtimissyvytydessä, missä se odottaa seuraavan profiilimittauksen alkua ajelehtien vapaasti virtausten mukana. Profiilimittauksen alkaessa Argo-poiju ensin kasvattaa tiheyttään edellä kuvatusti ja sukeltaa määriteltyyn profiilin aloittamissyvyyteen. Sitten se pienentää tiheyttään ja lähtee nousemaan kohti pintaa tehden samalla mittauksia. Profiilimittauksen kesto riippuu profiilin syvyydestä ja vesipatseen kerrostuneisuudesta, joka vaikuttaa siihen, miten paljon poijun on säädettävä tiheyttään. Pintaan päästyään poiju paikantaa itsensä GPS-satelliittien avulla ja sitten lähettää ja vastaanottaa dataa maista Iridium-satelliitin välityksellä. Tämä on poijun toimintasyklin ainut hetki, jolloin sille voidaan antaa uusia komentoja, mutta koska poiju lataa valmiit komennot tiedostosta, täytyy komennot päättää edellisen profiilin paikan ja arvioidun ajelehtimisnopeuden perusteella. Pinnalla ollessaan poiju ajelehtii pinnan virtausten mukana. Datan siirtämisen jälkeen poiju vajoaa takaisin ajelehtimissyvyyteensä ja jää odottamaan uuden profiilimittauksen ajankohtaa. Argo-poijut mittaavat veden ominaisuuksia myös ajelehtiessaan.

3.2 Argo Itämerellä

Ilmatieteen laitos on onnistuneesti operoinut Argo-poijuja Itämerellä vuodesta 2011 alkaen (Purokoski et al., 2013), ja nykyään toiminta on osa Euro-Argo RI -organisaatiota. Poijuja päätettiin kokeilla, sillä ne ovat kustannustehokas tapa kerätä profiilidataa merialueilta, joilla käydään harvoin tutkimusaluksilla. Dataa tarvitaan etenkin meren tilan seurantaan ja mallien kehittämiseen. Poijuja ei ole koskaan aikaisemmin käytetty samankaltaisissa matalissa, suljetuissa ja vähäsuolaisissa altaissa ja Argojen käyttöön liittyikin alueella joitakin hankaluuksia. Argo-poijut vaativat Itämerellä paljon valtameripoijuja enemmän monitorointia ja siten työaikaa.

Argo-poijujen tyypillinen toimintasykli Itämerellä on esitelty kuvassa 3.2. Toisin kuin valtameripoijut, jotka aloittavat profiilimittauksen sukeltamalla ensin ajelehtimissyvyyttään syvemmälle, Ilmatieteen laitoksen Argo-poijut on ohjelmoitu aloittamaan profiilimittaus suoraan ajelehtimissyvydeltä. Profiilimittauksia tehdään Itämerellä yleensä 1–7 päivän välein ja ajelehtimissyvyys on noin 100–200 m. Näin matalalta profiilimittaus kestää noin 20–30 minuuttia ja tavoitenopeus nousussa on 8 cm s^{-1} . Yleensä nousunopeus jää pienemmäksi. Datan lähetysnopeus pinnalla riippuu profiilin syvyydestä, mitattavien parametrien määrästä ja sensoreille asetetusta mittaustiheydestä. Itämerellä yksittäinen pintakäynti kestää noin 30–60 minuuttia, kun satelliittiyhteys toimii normaalisti.

Merialueen mataluuden ja vaihtelevan topografian takia poijujen paikkaa on seurattava tarkoin, jotta sukellussyvyyttä voidaan muuttaa tarvittaessa pohjakoske-



Kuva 3.2: Tyypillinen Argo-pojun toimintasykli Itämerellä. Valtamerillä profiilimittaus alkaa yleensä ajelehtimissyvyydestä syvemmälle laskeutumisella, mutta Itämerellä profiilit alkavat suoraan ajelehtimissyvyydestä mataluuden takia. Kuva on mukailtu Ilmatieteen laitoksen infografiikasta.

tuksen välttämiseksi. Painemittauksia voidaan käyttää Itämerellä suoraan syvyyslukemina, sillä meri on niin matala, ettei veden kokoonpuristumisella ole merkittävää vaikutusta tiheyteen (IOC et al., 2010). Näin ollen yksi desibaari vastaa noin metrin vesipatsasta. Poijuja voi ohjata vain sukellussyvyyttä muuttamalla, ja Itämerellä ne pyritään pitämään mahdollisimman syvällä, jotta syvänteitä kiertävät virtaukset pitäisivät ne tiettyssä altaassa (Simo Siiriä, henkilökohtainen tiedonanto). Jos Argo-poiju ajautuu matalampaan veteen, on sen sukellussyvyyttä nostettava ja tämä saattaa johtaa aina vain matalampaan veteen ajautumiseen (Tero Purokoski, henkilökohtainen tiedonanto). Koska poijuille täytyy antaa jatkuvasti käskyjä, ei yleisesti käytössä oleva pelkkään datan lähettämiseen käytetty yksisuuntainen satelliittiyhteys riitä, vaan kommunikaatiossa on käytettävä kaksisuuntaista satelliittiyhteyttä ja lyhyttä sukellusväliä. Tiheä sukellusväli myös lisää laitteen osien kulumista ja kuluttaa paristoja nopeammin, kuin valtamerikäytössä. Viikon profiilivälillä yksittäinen poiju voi mitata puolitoista vuotta putkeen, kun taas päivän profiilivälillä

paristojen kesto on noin kuusi kuukautta.

Koska Argo-poijujen sukellusalgoritmi on suunniteltu valtamerille, se on lähtökohtaisesti liian hidas Itämeren kaltaisella merialueella, missä merenpohja on lähellä asetettua sukellussyvyyttä. Purokoski et al., (2013) kuitenkin totesivat testien jälkeen, että poiju ei sukella liikaa yli halutun syvyyden, kun vallitsevasta tiheysprofiilista on alustava käsitys. Lisäksi koska Argo-poiju sukeltaa halutulle syvyydelle säätämällä tiheyttään, aiheuttaa halokliinin yläpuolisen vesimassa täyskierto syksyllä ja keväällä omat hankaluutensa. Täyskierron aikaan vesipatsaan tiheyserot ovat vähäiset ja poiju voi jo pienellä tiheyden muutoksella upota suoraan pohjaan. Tällaisissa tilanteissa tarvitaan erityisen tarkkaa seuranta sopivien sukellusparametrien löytämiseksi (Purokoski et al., 2013).

Argo-poijujen toimintaa Itämerellä hankaloittaa myös kausittainen merijää, jonka alla oleva poiju ei pääse nousemaan pintaan lähettämään kerättyä dataa. Lisäksi se voi vaurioitua jäähän osuessaan. Jääpeitteisillä alueilla pystytään kuitenkin operoimaan ohjelmoimalla poiju hyödyntämään mittaamaansa veden lämpötilaa. Jos lämpötila lähellä pintaa alittaa tietyn lukeman, voidaan olettaa pinnan olevan jäässä ja poiju ei nouse koko matkaa pinnalle, vaan mittaa osittaisen profiilin ja sukeltaa takaisin parkkeeraussyvyyteen. Jään ja pohjan lisäksi poiju saattaa pinnalla ollessaan jäädä ohikulkevan laivan alle, mikä on Itämerellä vilkkaan meriliikenteen takia valtameriä todennäköisempää, mutta kuitenkin melko epätodennäköistä.

Taulukko 3.1: Ilmatieteen laitoksen Itämerellä toteuttamat Argo-mittausjaksot vuosina 2012–2016.

Paikka	Aikaväli	Poijun nimi	Mitattuja profileja	WMO-numero
Selkämeri	17.05.–05.12.2012	APE1	251	6901901
Selkämeri	13.06.–02.10.2013	APE2	119	6902013
Gotlannin syväne	14.08.2013–21.08.2014	BAPE1	186	6902014
Selkämeri	30.05.2014–24.10.2015	APE1	171	6902017
Selkämeri	30.05.–14.11.2014	BAPE2	100	6902018
Gotlannin syväne	21.08.2014–05.08.2015	BAPE3	124	6902019
Gotlannin syväne	05.08.2015–03.08.2016	BAPE1	136	6902020
Selkämeri	23.09.2015–13.05.2016	BAPE2	84	6902021
Selkämeri	13.05.–11.10.2016	APE2	215	6902022
Selkämeri	13.07.–	APE1	25*	6902023
Gotlannin syväne	03.08.–	BAPE3	28*	6902024

Poijun WMO-numero on World Meteorological Organizationin vapaasti saatavilla olevalle oseenografiselle datalle määrittämä tunnistenumero, jonka avulla data löytyy kansainvälisestä tietokannasta (<http://www.coriolis.eu.org/Data-Products/Data-Delivery>).

* 31.12.2016 mennessä

Poijuja on käytetty Selkämerellä vuodesta 2012 ja Gotlannin syvänteellä vuodesta 2013. Nykyään molemmilla merialueilla on jatkuvasti vähintään yksi poiju toiminnassa ja viimeisimmät aikasarjat ovat yhä toiminnassa olevista poijuista. Yhteenveto poijujen mittausjaksoista löytyy taulukoista 3.1. Toisin kuin valtamerillä, missä Argo-poijut jätetään mereen ja ne lähettävät dataa kunnes hajoavat, Ilmatieteen laitos hakee poijuja takaisin maihin ja lähettää ne huoltoon valmistajalle, minkä jälkeen samoja poijuja voidaan käyttää uudestaan. Kaikki poijut ovat TELEDYNE Webb Researchin mallia APEX-APF9l. Kaikissa poijuissa on Sea-Bird SBE-41CP mallin CTD-anturi ja BAPE-poijuissa on lisäksi Aanderaa 4330 mallin happianturi ja WET Labs FLbb (CD) fluorometri.

Gotlannin syvänteellä Argo-poijut on opittu pitämään syvänteen sisällä ja sukellussyvyyttä on pystytty vuosittain lisäämään. Selkämerellä ei ole yhtä selkeästi määrättävää aluetta, missä poijun saisi pysymään, mutta tällä matalammallakin merialueella poijut on opittu pitämään syvemmissä vedessä. Ajelehtimista mataliin rannikkovesiin tapahtuu harvoin ja tapaukset liittyvät yleensä tilapäisiin voimakaisiin virtaustilanteisiin.

Purokoski et al., (2013) muokkasivat APE2-poijun (ks. taulukko 3.1) sukellusalgoritmia nopeammaksi, jotta poiju sukeltaisi haluttuun syvyyteen nopeammin ja reagoisi nopeammin halutun syvyyden saavuttamiseen. Sukellusta kontrolloivan algoritmin nopeus nostettiin nelinkertaiseksi ja halutun sukellussyvyyden säilyttämisen tarkkuus tuplattiin. Muutosten todettiin toimivan halutusti ja poiju pääsi sukellussyvyyteensä tavallista valtameripoijuja paljon nopeammin. Nopeampi laskenta kuitenkin kuluttaa poijun pattereita nopeasti, joten muutokset päätettiin jättää tekemätä muihin poijuihin mittausjaksojen keston pidentämiseksi.

4. Data ja käsittelymenetelmät

4.1 Argo-data

Tässä tutkielmassa on käytetty Ilmatieteen laitoksen Argo-poijuilla Selkämerellä tekemiä mittausjaksoja vuosilta 2012–2016 (katso taulukko 3.1). BAPE2:n happi- ja turbiditeettidata päätettiin jättää pois lähemmästä tarkastelusta, sillä poijuilla oli molemmilla mittausjaksoilla sukellusongelmia eikä datan laadunvarmistus ole tämän työn puitteissa mahdollista. BAPE-poijut ovat kuitenkin Ilmatieteen laitoksen ainoita veden happipitoisuutta mittaavia poijuja, joten BAPE2:n mittaamaa happidataa käytettiin Selkämeren yleisen happitilanteen arvioimiseksi.

Dataa on erillisiltä mittausjaksoilta aikaväliltä 17.5.2012–25.11.2016 siten, että joka kesältä on dataa vähintään kesäkuulta lokakuulle ja 2014–16 myös talvien yli. APE-poijujen data koostuu paine-, lämpötila-, ja suolaisuusmittauksista ja ne on vapaasti saatavilla erillisinä profiili- ja ajalehtimistiedostoina (<http://www.coriolis.eu.org/Data-Products/Data-Delivery>). Poijujen mittaamien profiilien ajallinen tiheys vaihteli sekä mittausjaksosta toiseen että myös niiden aikana ollen vuorokaudesta viikkoon. Profiilitiedostoissa mittaukset on keskiarvoistettu kahden metrin välein syvyyden suhteen. Ajalehtimistiedostoissa on dataa poijun ajalehtimissyvyydeltä ja sen aikaresoluutio on 15 minuutista tuntiin.

Datatiedostoissa on sekä reaaliaikaisesti saatavilla olleet alkuperäisarvot, että 'delayed mode'-arvot, jotka on tarkistettu ja korjattu ennen julkaisua. Tämän työn analyysissä käytettiin 'delayed mode'-arvoja aina kun ne olivat saatavilla. Tiedostoissa on mukana laatuleima jokaiselle muuttujalle ajasta ja koordinaateista CTD:n mittaamiin suureisiin (Carval et al., 2015). Tässä työssä datasta on poistettu ennen analyysiä laatuleiman 3 (korjattu, mutta edelleen mahdollisesti virheellinen) tai 4 (virheellinen ja korjauskelvoton datapiste) saaneet datapisteet. Tästä johtuen esimerkiksi esitetyt profiilien syvyydet saattavat poiketa muualla esitetystä, sillä tässä on huomioitu vain luotettava data.

4.2 Topografia

Kappaleen 5.2 profilisyvyyksien analyysissä käytettiin pohjatopografiana IOW:n Itämeren syvyysmallin versiota 16.01.2008 (Seifert et al., 2001). Topografiamalli on resoluutioltaan noin 2 km ja sen arvot ovat hilapisteen keskiarvoja, jotka on laskettu interpoloidusta tai ekstrapoloidusta olemassa olevasta syvyysdatasta. Topografiadataa on Selkämereltä ja erityisesti avomereltä huonosti saatavilla, kuten IOW:n datasetin kuvauksessakin mainitaan (www.io-warnemuende.de/iowtopo), mikä vaikuttaa syvyysdatan luotettavuuteen. Tämä johtuu osittain vähäisestä olemassa olevasta datasta ja osittain siitä, että tiheämmän erotteukyvyn syvyysdata ei aina ole vaapaasti saatavilla.

4.3 Sääasemat ja aaltopoiju

Tulosten analyysissä käytetyt tuulennopeus- ja suuntatiedot ovat Märketin ja Utön automaattisilta sääasemilta. Käytetyt tuulimittaukset olivat 10 minuutin keskiarvoja. Märketissä mittaukset tehdään 21 metrin ja Utössä 25 metrin korkeudella merenpinnasta. Alanyysissä käytettiin myös pintalämpötilahavaintoja Selkämeren aaltopoijulta. Pintalämpötilan aikaresoluutio on puli tuntia. Sekä automaattiset sääasemat että Selkämeren aaltopoiju kuuluvat Ilmatieteen laitoksen havaintoverkkoon. Sääasemien ja aaltopoijun sijainnit on esitetty kuvassa 2.1.

4.4 CTD-data

Tulosten analyysissä käytetty tutkimusaluksilla kerätty CTD-luotausdata on HELCOM¹in seuranta-asemien datasetistä vuosilta 2012–2016. Lisäksi käytettiin Selkämeren seurantapistettä SR5:llä mitattua pitkää aikasarjaa. Seurantapistettä SR5:n paikka näkyy kuvassa 2.1. Kaikki CTD-profiilit ladattiin ICES²in dataportaalista (<http://ices.dk/marine-data/data-portals/Pages/ocean.aspx>).

¹Baltic Marine Environment Protection Commission - Helsinki Commission

²The International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen, (2014)

4.5 Meriveden tilanmuuttujien laskeminen

4.5.1 TEOS-10

Tässä työssä suolaisuus on esitetty absoluuttisella suolaisuusasteikolla TEOS-10³ mukaan (IOC et al., 2010). Korjaustermien δS_A arvot Itämerelle on saatu McDougall, Jackett et al., (2012) tietokannan versiosta 3.0. Meriveden tiheys ja absoluuttinen suolaisuus S_A on laskettu paineen ja lämpötilan, sekä käytännöllisen suolaisuuden arvoista S_P (practical salinity) Python 2.7:lla käyttäen Gibbs-SeaWater (GSW) Oceanographic Toolbox:n (McDougall ja Barker, 2011) epävirallisen Python-käännöksen versiota 3.0.3 (<https://pypi.python.org/pypi/gsw/>). S_P on mitattua veden sähkönjohtavuudesta laskettu suolaisuus, nk. käytännöllinen suolaisuus, jona Argo-poijujen mittaukset ja kaikki suolaisuusdata arkistoidaan TEOS-10 käytännön mukaisesti. Selkämerellä S_P on keskimäärin 0.1 yksikköä S_A :ta pienempi.

4.5.2 Happidata

Argo-poijujen happidata on saatavilla muodossa $\mu\text{mol kg}^{-1}$. Tätä tutkielmaa varten happidata muunnettiin muotoon ml^{-1} :

$$O_{\text{ml}^{-1}} = \frac{O_{\mu\text{mol kg}^{-1}} * \rho_w}{1000 * M_O}, \quad (4.1)$$

missä $O_{\text{ml}^{-1}}$ on happikonsentraatio yksikössä ml^{-1} , $O_{\mu\text{mol kg}^{-1}}$ on happikonsentraatio yksikössä $\mu\text{mol kg}^{-1}$, $M_O = 44,661 \text{ g mol}^{-1}$ on hapen moolimassa ja ρ_w on TEOS-10 mukaan laskettu veden tiheys.

4.6 Halokliinin ja termokliinin laskutapa

Termokliinin ja halokliinin syvyyden automaattinen laskeminen yksittäiselle lämpötila- ja suolaisuusluotaukselle on haastavaa, ja eri merialueilla ja eri tavoin kerrostuneille vesimassoille toimivat erilaiset määritelmät. Tässä tutkielmassa käytetyt menetelmät on säädetty toimimaan juuri Selkämeren Argo-poijujen datasetille. Koska Selkämeren kerrostuneisuus on heikompi kuin esimerkiksi varsinaisella Itämerellä, eikä halokliini ole aina edes silmämääräisesti selkeä, eivät esitetyt laskutavat sovi sellaisenaan muille merialueille. Tässä työssä esitetyt halokliinin ja termokliinin syvyydet on määritelty tietyinä diskreetteinä syvyyksinä, eikä kerroksina, jollaisia ne todellisuudessa ovat.

³The International Thermodynamic Equation Of Seawater - 2010

4.6.1 Termokliini

Tässä työssä termokliinin syvyys on määritetty vain profileille, jotka ovat yli 40 metriä syviä, ja termokliinin syvyys sai olla korkeintaan 35 metriä. Lämpötilamittauksista lasketaan vertikaaligradientti mittausten välillä, ja termokliinin syvyys otetaan suurimman gradientin kohdalta. Gradientin on kuitenkin oltava vähintään $0,4\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$, jotta se otetaan huomioon. Argo-profilien lämpötilan resoluutio on 2 m, joten myös gradientit termokliinin laskemiseksi saadaan kahden metrin välein.

4.6.2 Halokliini

Halokliinin syvyys on tässä työssä määritetty vain profileille, jotka ovat yli 50 metriä syviä. Halokliinin katsotaan sijaitsevan syvyydellä, missä mitattu suolaisuus on $0,2\text{ g kg}^{-1}$ suurempi kuin pinnassa. Kuitenkin, jos suolaisuus on jo 36 metrissä yli $0,1\text{ g kg}^{-1}$ pintasuolaisuutta suurempi, verrataan mittauksia 36 m:n suolaisuuteen pinnan sijaan. Tämä siksi, että välillä termokliinin rajaamaan sekoituskerrokseen muodostuu makean veden linsejä, jotka muodostavat suolaisuusgradientin. Tämä gradientti ei kuitenkaan ole pysyvä halokliini, joka menetelmällä halutaan laskea.

5. Tulokset

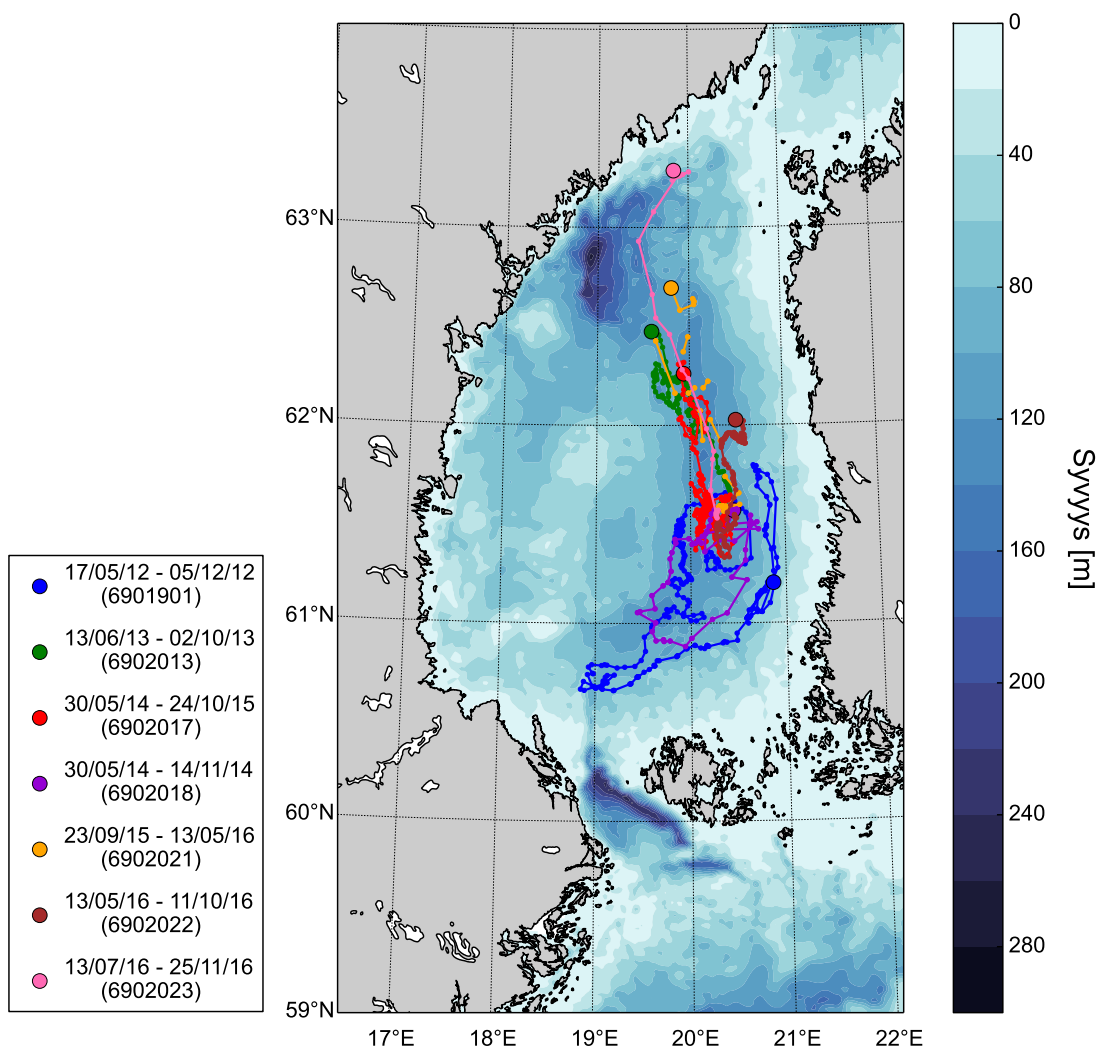
5.1 Ajelehtimisreitit

Selkämerellä 2012–2016 operoidut poijut on kaikki laskettu liikkeelle läheltä samaa paikkaa syvänteen keskiosissa, mistä ne lähtivät ajelehtimaan eri suuntiin (kuva 5.1). Yksittäisten mittausjaksojen aikavälit löytyvät taulukosta 3.1. Ensimmäisen mittausjakson aikana vuonna 2012 (WMO 6901901) poiju ajelehti syklonista rataa etelään Ahvenanmeren suuaukolle ja sitten Suomen rannikkoa pitkin matalille vesille. 2013–2016 poijut pysyivät keskellä Selkämeren syvää aluetta ja niiden reitit olivat hyvin samankaltaiset lukuunottamatta syksyä 2016, jolloin APE1-poiju (WMO 6902023) ajelehti suoraan Selkämeren syvännettä pitkin Ruotsin aluevesille. APE2 (WMO 6902022) puolestaan ajautui elokuussa 2016 syvänteen reunalle Suomen rannikkoa kohti ja pidettiin tämän jälkeen tarkoituksella paikallaan matalaan ajelehtimisen välttämiseksi.

5.2 Profilien vertikaalinen kattavuus

Argo-poijujen profilisyvyyyksiä, arvioitua pohjan syvyyttä ja näiden erotusta sekä arvioituja pohjakontakteja vertailtiin (kuva 5.2). BAPE2-pojulla oli sukellusongelmia molemmilla mittausjaksoillaan, joten se on jätetty pois laskuista (WMO 6902018 ja 6902021). Pohjan syvyydet on arvioitu IOW:n Itämeren syvyysmallin versiosta 16.01.2008 (Seifert et al., 2001) etsimällä syvyysmallin lähinnä poijua oleva hilapiste. Syvyysmallin tarkemmat tiedot on esitetty kappaleessa 4.2. Poijujen keskimääräinen etäisyys pohjasta pieneni ensimmäisten kahden mittausjakson yli 30 metristä alle 10 metriin. Ensimmäisten mittausjaksojen jälkeen poijut pyrittiin pitämään mahdollisimman syvällä niiden sijainnin kontrolloimiseksi.

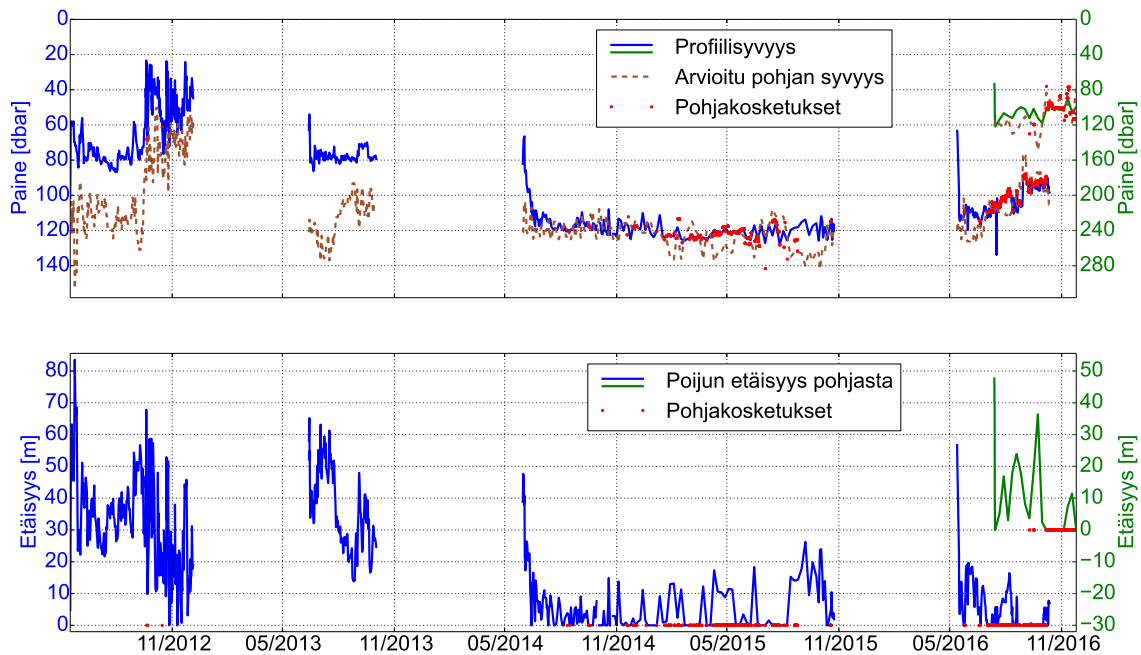
Mitatun syvyysdatan saatavuus Selkämeren syvänteeltä on huono ja syvyysmallien resoluutio karkea (4.2), joten syvyyden arvioiminen juuri poijun kohdalla on vaikeaa. Hilapisteen koko syvyysmallissa on 2 km ja mallissa käytetty data on monin paikoin interpoloitua tai ekstrapoloitua, joten 20 cm leveän Argo-pojun tarkas-



Kuva 5.1: Argo-pojujen ajelehtimisreitit Selkämerellä eri mittausjaksoilla. Suluissa olevat numerot ovat mittausjaksojen WMO-numerot (taulukko 3.1). Yksittäisten profilien paikat on merkitty pisteillä ja näitä yhdistävä viiva näyttää poijun reitin. Suuremmat ympyrät näyttävät poijujen noutopaikat. Pohjatopografiana on käytetty IOW:n Itämeren syvyysmallia (katso kappale 4.2).

ta paikasta ei ole suurta hyötyä tässä suhteessa. Lisäksi poijun koordinaatit, joihin topografiadataa verrataan, ovat poijun paikka pinnalla profilimittauksen ja datan lähettämisen jälkeen. Poiju on siis luultavasti ajelehtinut jonkin verran sekä profilimittauksen aikana, että pinnalla, profiilin aloituspisteeseen nähden. Tämä liike on kuitenkin hyvin pientä verrattuna syvyyshilan pisteiden kokoon ja niiden sisällä oletettuun syvyysvaihteluun. Syvyyden arvioinnin vaikeus näkyy esimerkiksi siinä, että poijun profilisyvyys ylittää välillä arvioidun pohjan syvyyden yli 10 metrillä (kuva 5.2).

Pohjakosketuksia tapahtui lähinnä arvioidun etäisyyden pohjasta ollessa alle 20 m, erityisesti vuoden 2015 mittausjaksolla ja kesällä 2016. Elokuussa 2016 APE2



Kuva 5.2: Argo-profilien vertikaalinen kattavuus Selkämerellä. Ylemmässä kuvaajassa on esitetty poijujen profiilisyvyys ja arvioitu pohjan syvyys. Alemmassa kuvassa on esitetty poijun etäisyys pohjasta profiilimittauksen alkaessa. Punaiset pisteet molemmissa kuvissa merkkavat pohjaan osumisen ajankohtia. Viimeinen mittausjakso (6902023, vihreä viiva) on piirretty eri asteikolla, jotta päällekkäisten mittausjaksojen data erottuisi paremmin. Pohjan syvyys on saatu IOW:n Itämeren syvyysmallista (tarkemmin kappaleessa 4.2).

ajautui matalaa kohti ja se päätettiin pitää pohjassa profiilien välillä ajalehtimisen välttämiseksi. Kuvaan 5.2 punaisilla pisteillä merkityt arvioidut pohjakosketukset on etsitty poijujen ajalehtimisdatasta olettamalla, että jos poijun mitaama paine vaihtelee alle 0,15 dbar kahdeksan tunnin aikana, voidaan poijun olettaa olevan pohjassa. Pisteiden syvyyksinä kuvaajassa on käytetty kyseisen ajanhetken ajalehtimisdatan syvyyttä, joten ne eivät välttämättä osu samalle viivalle profiilien aloitussyvyyden kanssa. Pohjakosketukset antavat arvion todellisesta syvyydestä.

Taulukko 5.1: Argo-pojujen profiilien syvyys ja niiden vertikaalinen kattavuus eri mittausjaksoilla.

WMO-numero	Keskimääräinen profiilin syvyys [m]	Keskimääräinen ajalehtimissyvyys [m]	Keskimääräinen etäisyys pohjasta [m]	Keskimääräinen etäisyys pinnasta [m]
6901901	62	67	32	3,5
6902013	77	77	37	4,1
6902017	115	119	7	3,3
6902022	101	103	4	3,9
6902023	104	107	13	3,6

Ensimmäisten kahden jakson aikana profiilisyvyyden etäisyys pohjasta oli keskimäärin yli 30 m ja vuodesta 2014 eteenpäin noin 5 m. Vesipatsaasta jäi siis keskimäärin tämän verran pohjalta mittaamatta. Pinnalta mittaamatta jäi keskimäärin ylimmät 3–4 m, sillä Ilmatieteen laitoksen käytettämien APEX-pojuijen Sea-Bird SBE-41C-CTD:n pumppu menee pois päältä hieman ennen pintaa. Tämä tehdään, jottei CTD vahingossa pumppaa sisään lämpöä veden sijasta ja mene rikki. Samaan poijumalliin on saatavilla erilaisia sensoreita, joista osa mittaa pintaan asti, eli tämä rajoitus koskee ainoastaan kyseistä sensorityyppiä. Taulukossa 5.1 on esitetty profiili- ja ajelehtimissyvyydet sekä profiilien vertikaalinen kattavuus eri vuosina. Profiilisyvyydet kasvoivat alun noin 60 metristä noin 100 metriin. Keskimääräiset profiili- ja ajelehtimissyvyydet eivät ole täysin samat, sillä poijut liikkuvat ajelehtimissyvyydessään jonkin verran myös pystysuunnassa.

5.3 Hydrografia

5.3.1 Aikasarjat

Vuosien 2012–2016 aikana argo-pojujen Selkämerellä mitaamat lämpötila-, suolaisuus-, happi- ja turbiditeetti-profiilit sekä lämpötilan ja suolaisuuden avulla lasketut tiheyden arvot on esitetty kuvissa 5.3a–5.3e. Profiilit on piirretty aikajärjestyksessä paikasta riippumatta. Punaiset viivat kuvissa näyttävät termokliinin ja vihreät viivat halokliinin arvioidun syvyyden. Osa datasta on poistettu huonojen laatulei-mojen takia. Esimerkiksi vuoden 2012 profiilit olivat syvempiä, kuin 80 m ja 2015–16 talvella näkyvissä aukoissa (kuvat 5.3a ja 5.3b) on dataa, mutta ne leikkautuivat pois huonon laadun takia. Myös talven 2015–16 happidata vaatii ylimääräisen laaduntarkastuksen eikä laatua pysty tämän työn puitteissa varmistamaan.

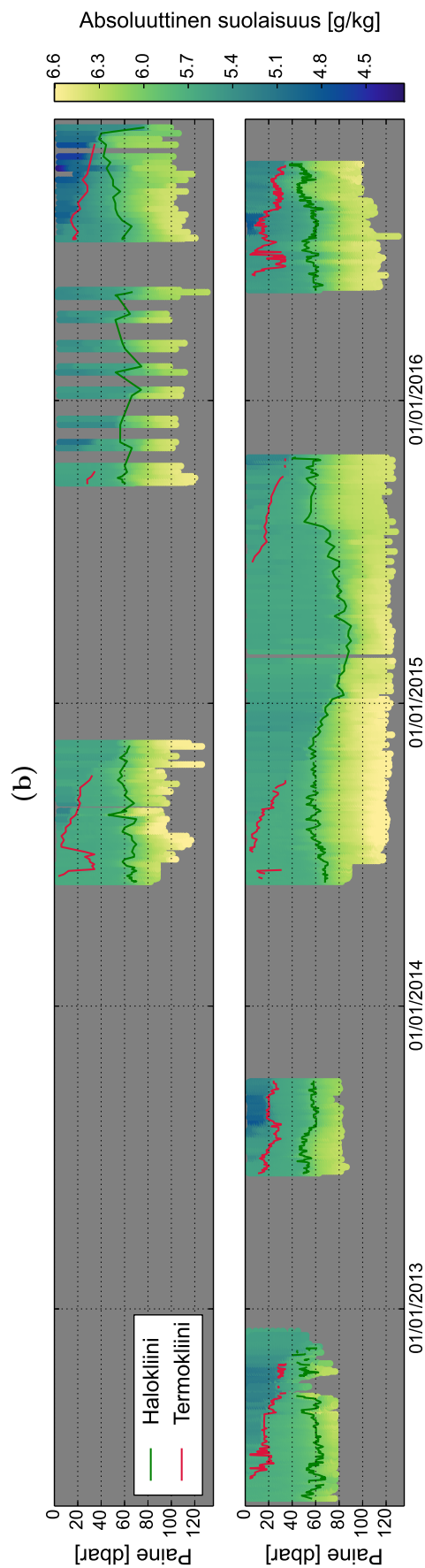
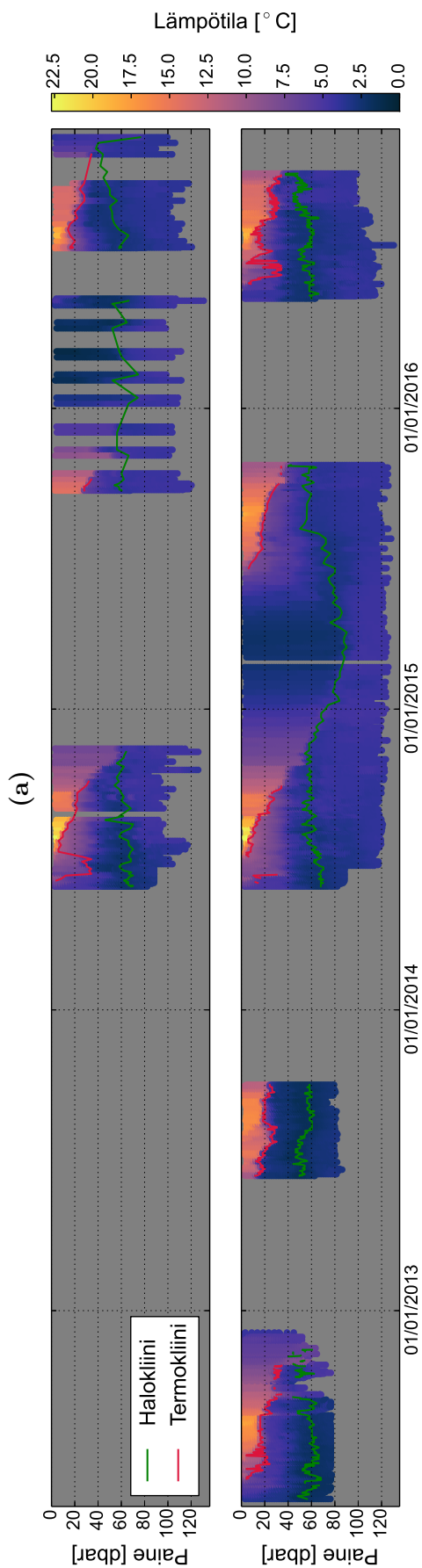
Lämpötilan aikasarjassa näkyy termokliinin kehitys kesän mittaan voimistuvana lämpötilagradienttina pintakerroksessa ja alle jäävä kylmempi dikotermi eli vanhan talviveden kerros, sekä syksyinen täyskierto vakiolämpötilana halokliiniin asti (kuva 5.3a). Termokliinin ja halokliinin laskutapa profileista on selitetty tarkemmin kappaleessa 4.6. Korkein mitattu lämpötila koko aikasarjassa, 22,7 °C, mitattiin 4,7 metrin syvyydessä yöllä 28.7.2014 ja matalin mitattu lämpötila oli 0,9 °C ja se mitattiin 4,4 metrin syvyydessä 10.3.2016. Koska käytetyt Argo-pojut eivät mitanneet pintaan asti, oli todellinen pintalämpötilan maksimi luultavasti korkeampi, ja minimi matalampi. Termokliinin syvyys vaihteli vuosittain, ja syvyyden äkilliset, jopa yli 10 metrin muutokset rajoittuivat kesän alkuun. Tämä johuu termokliinin laskutavasta, jossa lämpötilan vertikaaligradientin vähimmäisvoimakkuus on asetettu

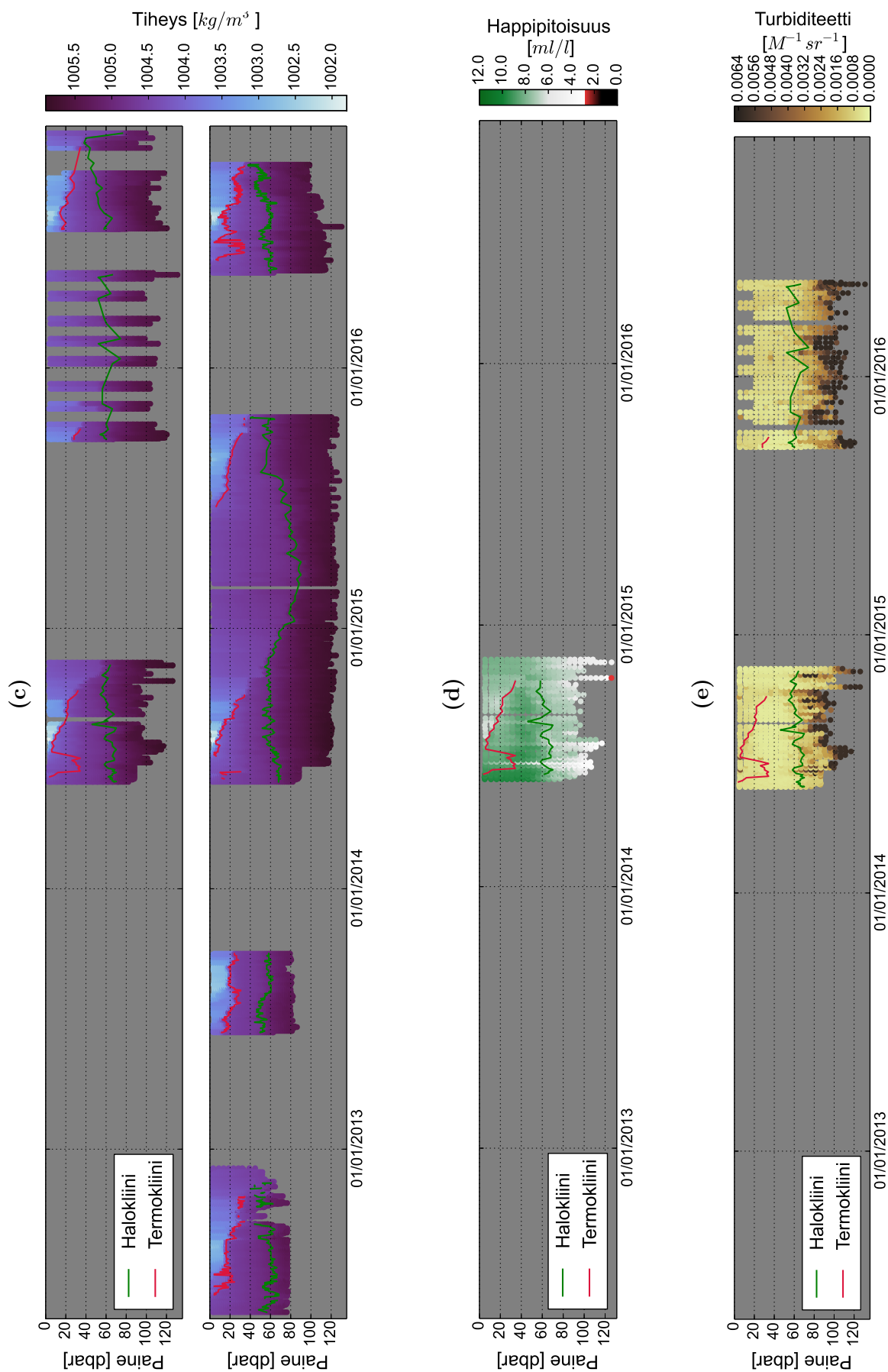
Taulukko 5.2: Selkämeren pintakerroksen lämpötilan (T_s) kuukausikeskiarvot vuosilta 2012–2016 ja pohjakerroksen lämpötilan (T_b) kuukausikeskiarvot vuosilta 2014–2016. Viimeisessä sarakkeessa on koko vuoden keskilämpötilat vuosien 2014–2016 perusteella.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
T_s [°C]	3,6	2,7	2,1	2,4	3,7	5,3	7,0	8,2	9,3	8,8	6,7	5,2	6,1
T_b [°C]	4,3	4,2	4,3	4,1	3,5	3,2	3,4	3,5	4,1	4,1	4,2	4,4	4,3

pieneksi, $0,4^\circ\text{C}$ (kappale 4.6.1), jolloin kesän alun ensimmäiset heikot ja helposti sekoittuvat kerrostumiset näkyvät. Halokliinin alapuolella lämpötilan vaihtelut olivat pieniä. Halokliinin yläpuolisen pintakerroksen ja alapuolisen pohjakerroksen keskilämpötilat Selkämerellä olivat kevästä 2014 alkaneen jatkuvan aikasarjan perusteella $6,1^\circ\text{C}$ ja $4,3^\circ\text{C}$. Vuosien 2012–2016 perusteella pintakerrokselle ja 2014–2016 perusteella pohjakerrokselle laskettujen lämpötilan kuukausikeskiarvojen vaihtelu on pintakerroksessa paljon pohjakerrosta suurempaa, mikä on oletettavissa (katso taulukko 5.2). Pintakerroksen keskilämpötila vaihteli maaliskuun $2,1^\circ\text{C}$:sta syyskuun $9,3^\circ\text{C}$:een, kun taas pohjakerros oli lämpimimmillään joulukuussa ($4,4^\circ\text{C}$) ja kylmimmillään kesäkuussa ($3,2^\circ\text{C}$). Yksittäiselle profiilille kerrosten lämpötilat on laskettu keskiarvoistamalla koko kerroksen mittaukset. Pohjakerroksen arvot on laskettu vain 2014 alkaen, sillä 2012 ja 2013 mittausjaksojen profiilit eivät yltäneet lähelle pohjaa, jolloin pohjakerroksen tuloksissa painottuisi liikaa ylemmän vesipatsaan lämpötila. Tällöin saatu lämpötila on todellisuutta alhaisempi, sillä pohjan tihein ja lämpimin vesi jää mittaamatta. Esimerkiksi vuodesta 2014 vuoteen 2015 suoritettulla mittausjaksolla (WMO 6902017 taulukossa 3.1) profiilit ylsivät lähelle pohjaa. Jos näistä profileista jättää huomiotta alimmat 30 metriä, eli saman verran, mitä 2012 ja 2013 mittauksista keskimäärin puuttui, saadaan pohjakerroksen lämpötilasta keskimäärin $0,2^\circ\text{C}$ matalampi, kuin pohjaan asti ulottuvilla profileilla. Suurimmillaan kokonaisten profiilien lämpötila oli $1,3^\circ\text{C}$ korkeampi.

Merkittävin piirre suolaisuuden aikasarjassa on halokliini ja sen syvyyden vaihtelu, jossa näkyy 2015–16 selkeä aaltomainen kehitys (kuva 5.3b). Halokliini oli matalimmillaan loppukesästä ja syksyllä ja syvimmillään alkukevästä. Kesällä termokliini eristää alapuolisen veden tuulen sekoitukselta ja halokliini madaltuu kunnes syksyllä termokliinin hävittyä täyskierto sekoittaa pintakerroksen ja sekoitus pääsee syventämään halokliinia talven aikana. Vaihtelun tarkempaan tarkasteluun vaadittaisiin profileja useamman talven ajalta. Halokliini oli kappaleessa 4.6.2 määritellyn laskutavan mukaan matalimmillaan 38 m ja syvimmillään 90 m, ja 25–75% vaihteluväli oli 54–71 metriä. Ääriarvojen vaihteluväli on suuri ja matalin laskettu halokliini hyvin matalalla, mikä voi johtua halokliinin sijainnin laskutavasta sekä poijun sijainnista. Keskimäärin halokliini oli 58 m syvällä, mikä on kirjallisuuteen verrattuna ma-





Kuva 5.3: Argo-poiijujen vuosina 2012–2016 mitaamat a) lämpötila-, b) suolaisuus-, c) tiheys-, d) happi- ja e) turbiditeettiprofiilit aikasarjana. Absoluuttisen suolaisuuden ja tiheyden arvot on laskettu profilimittausten lämpötilan ja käytännöllisen suolaisuuden avulla. Happipitoisuuden kuvaajassa punaisesta mustaan olevat arvot merkitsevät vähähappista vettä (alle $2,8 ml l^{-1}$) ja mustat happikatoa (alle $1,4 ml l^{-1}$). Punainen viiva esittää termokliinin arvioitua syvyyden ja vihreä halokliinin.

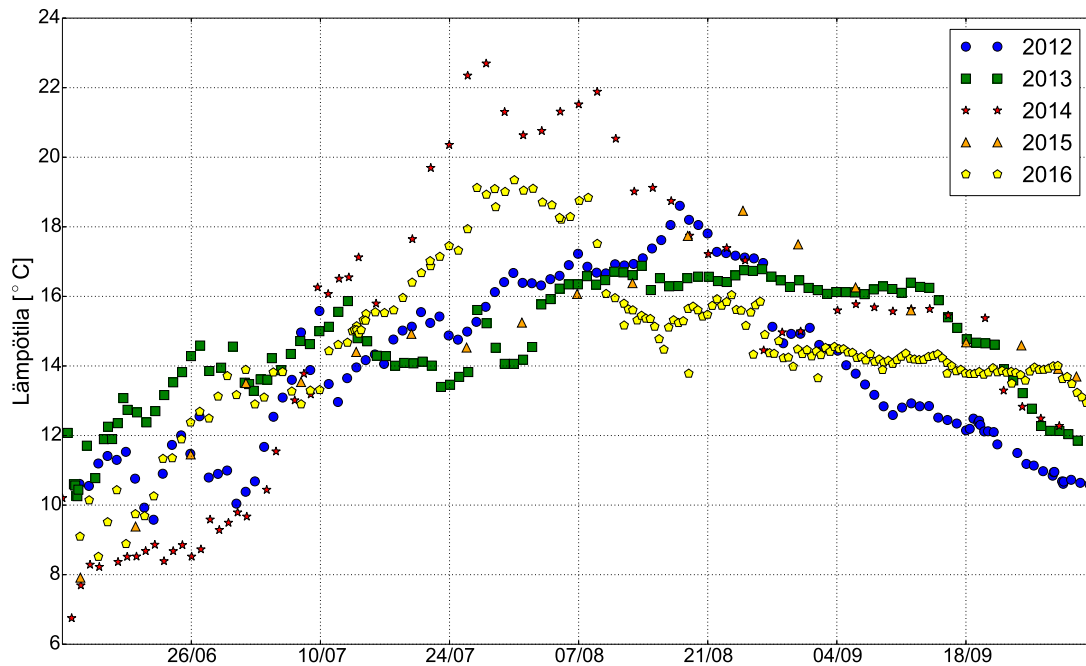
tala, mutta mittausjaksot ovat painottuneet kesälle ja syksylle, jolloin halokliini on yleensä matalampi (Meier, 2007). Termokliinin yläpuoliseen sekoittuneeseen kerrokseen näyttää vuosina 2012, 2013 ja 2016 muodostuneen makeamman veden kerros, mutta vuosina 2014 ja 2015 ilmiö ei ole havaittavissa. Pintasuoloisuuden suhteen poijun sijainti vaikuttaa tuloksiin merkittävästi Selkämeren suolaisuusjakauman takia (kappale 2.2), ja esimerkiksi vuonna 2014 toisessa samanaikaisista mittausjaksoista näkyy pinnassa hieman makeampaa vettä. Korkein koko mittausjaksolla mitattu suolaisuus oli $6,6 \text{ g kg}^{-1}$ 105 metrin syvyydessä 18.6.2014 ja pienin $4,2 \text{ g kg}^{-1}$ pinnan lähellä 6.10.2016. Pohjan läheinen suolaisuus vaihteli välillä $6,2\text{--}6,6 \text{ g kg}^{-1}$ niissä profiileissa, jotka ylsivät lähelle pohjaa. Selkämeren pintakerroksen keskisuolaisuudeksi 2014 alkaneen jatkuvan aikasarjan perusteella saatiin $5,5 \text{ g kg}^{-1}$, ja minimi- ja maksimisuolaisuudet olivat $4,8 \text{ g kg}^{-1}$ (21.10.2016) ja $5,7 \text{ g kg}^{-1}$ (29.6.2012). Halokliinin alapuoliselle pohjakerrokselle saatiin keskimääräiseksi suolaisuudeksi $6,1 \text{ g kg}^{-1}$ ja minimi- ja maksimisuolaisuudet olivat $5,7 \text{ g kg}^{-1}$ (13.5.2016) ja $6,3 \text{ g kg}^{-1}$ (5.1.2015). Pohjakerroksen ääriarvoja laskettaessa on huomioitu vain 2014 ja sen jälkeen mitatut profiilit, sillä 2012 ja 2013 mittausjaksojen profiilit eivät yltäneet lähelle pohjaa, jolloin pohjakerroksen tuloksissa painottuisi liikaa ylemmän vesipatsaan suolaisuus.

Mitatusta lämpötilasta ja lasketusta absoluuttisesta suolaisuudesta lasketussa tiheydessä näkyy sekä termokliinin että halokliinin aiheuttamat tiheysgradientit (kuva 5.3c). Pyknokliinien vaikutus näkyy myös vuoden 2014 happiprofiileissa (kuva 5.3d), missä happipitoisuus termokliinin yläpuolella näyttää kesän mittaan laskevan ja termokliinin alla on hapekkaampaa vettä. Halokliinin alla taas happipitoisuus on matalampi. Matalin mitattu happipitoisuus oli $2,80 \text{ ml l}^{-1}$, mikä on juuri vähähap-pisen veden määritelmän rajalla (alle $2,8 \text{ ml l}^{-1}$ (Ærtebjerg et al., 2005)), mutta ei kuitenkaan tarkoita happikatoa (alle $1,4 \text{ ml l}^{-1}$ (Ærtebjerg et al., 2005)). Happikato määritellään usein myös alle $2,0 \text{ ml l}^{-1}$ (esim. Conley et al., (2009)), mutta myös tällä määritelmällä Argo-poijujen mittauksen perusteella Selkämeren happitilanne on toistaiseksi hyvä. On kuitenkin hyvä muistaa, etteivät Argo-profiilit aina yletä pohjaan asti, missä happipitoisuus on yleensä matalin. Turbiditeetissa ei tapahdu merkittäviä muutoksia ja se on hyvin pieni halokliinin yläpuolella, ja se kasvaa kohti pohjaa (kuva 5.3e).

5.3.2 Vuosien välinen vaihtelu

Lämpötilan ja suolaisuuden kehitystä kesällä ja alkusyksystä (13.6.–2.10.) sekä vuosien 2012–2016 välisiä eroja arvioitiin meren pinnan lähellä, halokliinin yläpuolisessa pintakerroksessa ja halokliinin alapuolisessa pohjakerroksessa. 13.6.–2.10. valikoitui vertailun aikaväliksi, sillä tältä väliltä on Argo-dataa joka vuosi. Etenkin suolaisuus-

den muutosten tarkastelussa on tärkeää huomioida poijun sijainti, sillä suolaisuus ei ole jakautunut Selkämerellä tasaisesti. Tässä sijainnin vaikutus otetaan huomioon kvalitatiivisesti eri ilmiöiden syiden tarkastelussa. Profilien syvyys vaihtelee, samoin kuin halokliinin syvyys, mikä vaikuttaa pinta- ja pohjakerroksen paksuuteen, ja siten myös laskettuihin keski- ja ääriarvoihin. Esitetyt profilikohtaiset lämpötilat ja suolaisuudet ovat aina yhden profiilin halokliinin ylä- tai alapuolisten mittausten keskiarvoja. On myös hyvä huomata, että tässä halokliinin ja termokliinin syvyysdeksi on arvioitu yksi syvyys (katso kappale 4.6), vaikka todellisuudessa kyse on kerroksesta. Termokliinin syvyydet on laskettu niille profileille, joista löytyy vähintään $0,4\text{ °C m}^{-1}$ lämpötilagradientti (tarkemmin kappaleessa 4.6.1). Koska argo-pojujen mittaamat profiilit eivät ole tasaisesti jakautuneet aikavälille, on keskiarvoistaminen tehty integroimalla aikasarjan alle jäävä pinta-ala jakamalla vertailuvälin pituudella (puolisuunnikassääntö).

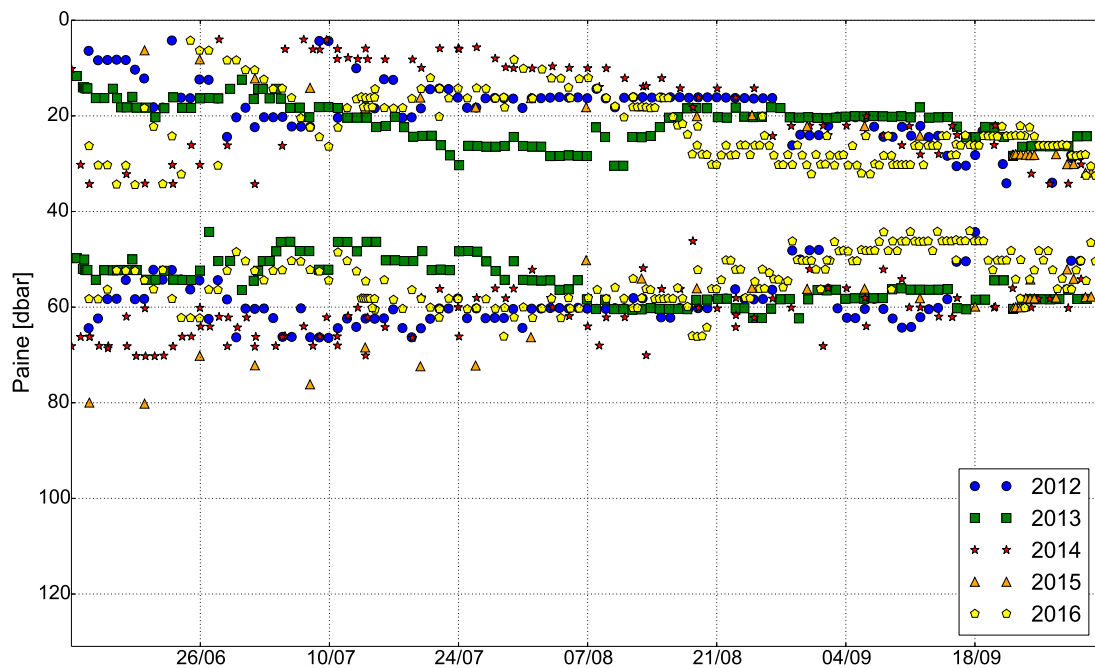


Kuva 5.4: Selkämeren pintalämpötila vuosina 2012–2016.

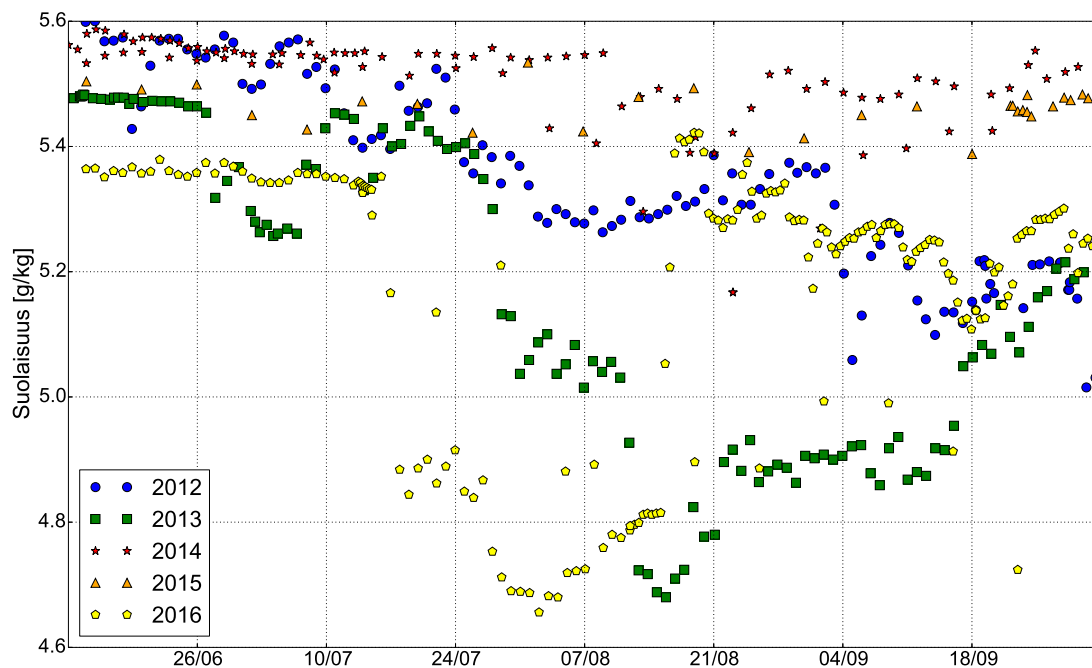
Selkämeren pintalämpötila kehittyi vertailuvuosien 2012–2016 kesinä samankaltaisesti (kuva 5.4). Tässä pintalämpötila tarkoittaa profilimittauksen lähinnä pintaa mitattua arvoa, joka vaihtelee 2,5–6 m välillä ja on keskimäärin noin 4 metriä (taulukko 5.1). Lämpötila nousi vertailujakson alusta (13.6.) noin 1 °C viikossa elokuun alkupuoliskolle, minkä jälkeen se laski $0,5\text{ °C}$ viikossa vertailujakson loppuun. Korkein pintalämpötila vuosina 2012–2016 mitattiin vuonna 2014, jolloin se ylsi noin $22,7\text{ °C}$:een. Korkea pintalämpötila johtuu siitä, että vuosi 2014 oli

myös ilman lämpötilalta Suomen siihen asti toiseksi lämpimimmäksi mitattu vuosi (<http://ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2014>, siteerauspäivä 23.5.2017). Muita vuosia korkeampi pintalämpötila näkyy myös esimerkiksi Selkämeren aaltopoijun pintalämpötilahavainnoissa, joissa pintavesi oli heinä-elokuussa noin 3°C muita vuosia lämpimämpää ja lämpimimmillään $23,5^{\circ}\text{C}$. Vuonna 2014 lämpeneminen oli myös selvästi muita vuosia nopeampaa, jopa 6°C kahdessa viikossa. Kesän 2013 alussa pintalämpötila oli muita korkeampi ja 2014 kaikkein matalin, mutta 2013 lämpeneminen pysähtyi aikaisin ja kesän maksimilämpötila oli vertailuvuosista alhaisin, $16,9^{\circ}\text{C}$. Vuonna 2014 pintalämpötilan maksimi saavutettiin heinäkuun lopulla, kun taas muina vuosina maksimilämpötila mitattiin vasta elokuun puolivälissä, jonka jälkeen kaikkina vuosina pinta alkoi kylmenemään. Vuosien 2012 ja 2014 elokuun lopulla pintalämpötila laski äkisti noin 3°C kahdessa päivässä, vuonna 2012 28.8. ja vuonna 2014 26.8. Märketin ja Utön sääasemien havainnoissa näkyy molempina vuosina samaan aikaan lyhyt kovien tuulten jakso, 2012 noin 17 m s^{-1} ja 2014 yli 20 m s^{-1} . Selkämeren aaltopoijun havainnoissa näkyy samaan aikaan sekä 2012 että 2014 kohonnut aallonkorkeus, sekä pintalämpötilan äkillinen lasku. Tämä viittaa lämpötilan laskun johtuneen tuulen ja aallokon aiheuttamasta sekoittumisesta. Myös termokliinin syvyydessä näkyy samaan aikaan syveneminen molempina vuosina (katso kuva 5.5). Pintalämpötila laski laajalla alueella yhtäaikaa ainakin 2012, sillä Argo-poiju oli silloin paljon Selkämeren keskiosissa sijaitsevaa aaltopoijua etelämpänä. Pintalämpötilassa ei kaiken kaikkiaan havaittu alueellisia eroja Argo-profilien perusteella.

Pintasuoloisuuden ja poijun sijainnin välinen korrelaatio on voimakkaampi, kuin lämpötilan suhteen, sillä Selkämeren pintavedessä vallitsee virtauskentän ja jokivalunnan aiheuttamia selkeitä horisontaalisia suolaisuusgradientteja. Tämä on otettu huomioon suolaisuudessa tapahtuvien muutosten syiden tarkastelussa. Argo-poijuilla mitattu pinnan suolaisuus kehittyi eri vuosina hyvin eri tavalla (kuva 5.6). Vuosina 2014 ja 2015 suolaisuus vaihteli koko vertailujakson aikana noin $0,2\text{ g kg}^{-1}$ ja pysyi koko ajan vertailujaksoista korkeimpana, noin $5,5\text{ g kg}^{-1}$. Vuonna 2012 taas suolaisuus laski tasaisesti koko kesän $5,6\text{ g kg}^{-1}$:sta noin $5,6\text{ g kg}^{-1}$:een. 2013 ja 2016 pintasuolaisuus pysyi alkukesän melko tasaisena, kunnes laski 2013 heinäkuun lopussa ja 2016 heinäkuun puolivälissä parin päivän aikana jopa $0,4\text{ g kg}^{-1}$. Myös 2012 pintasuolaisuus laski heinäkuussa, mutta lievemmin kuin 2013 ja 2016. Suolaisuus pysytteli alhaisena 1–1.5 kuukautta ja palasi sitten melkein samalle tasolle kuin kesän alussa. Nämä äkilliset pintasuolaisuuden madaltumiset voivat johtua joko makeamman pintaveden advektiosta, tai poijun ajelehtimisesta vähäsuolaisemmille vesille. Poijujen eri vuosien ajelehtimisreittien perusteella (kuva 5.1) vuosina 2013 ja



Kuva 5.5: Termokliinin (kolmiot), ja halokliinin (ympyrät) syvyys Selkämerellä eri vuosina laskettuna Argo-profileista. Laskutavat on esitelty kappaleessa 4.6.



Kuva 5.6: Selkämeren pintasuolaisuus vuosina 2012–2016.

2016 poijujen ajelehtimisreitit eivät poikenneet merkittävästi muiden vuosien reiteistä, joten pintasuolaisuuden laskussa on todennäköisesti kyse makean veden linssin

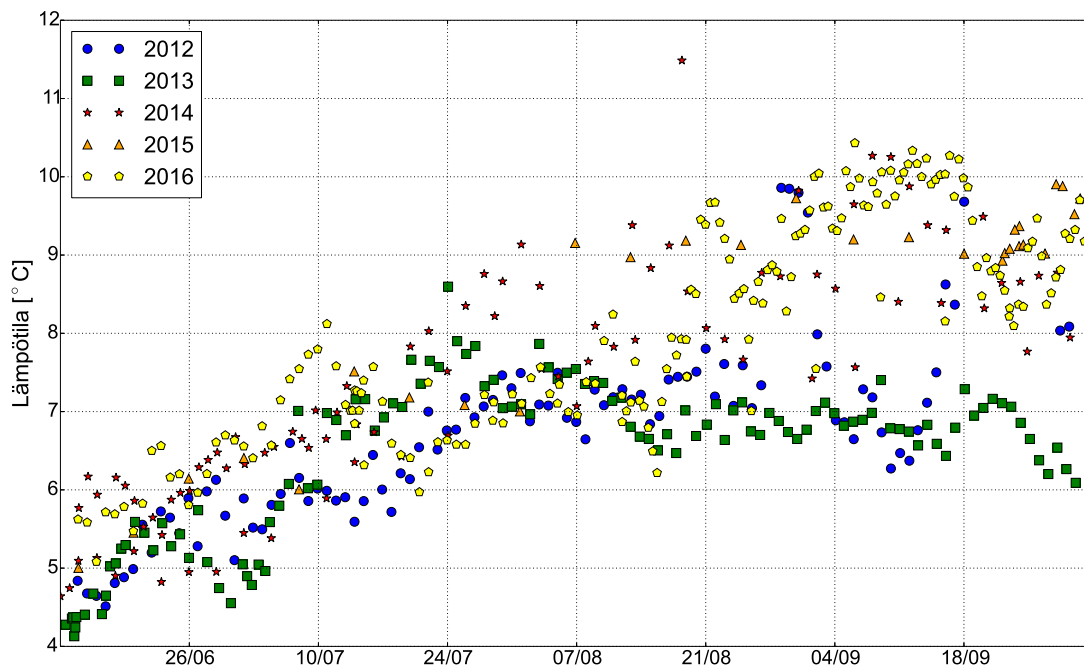
advektiosta.

Termokliinin ja halokliinin syvyyden kehitys vertailuvuosina on esitetty kuvassa 5.5. Koska alueen syvyys vaikuttaa myös kliinien syvyyteen, on vertailussa otettu huomioon myös poijun paikka muutosten syiden tarkastelussa, ja termokliinin syvyyttä ei ole laskettu alle 40 metriä, eikä halokliinin alle 50 metriä, syville profiileille (kappale 4.6. Yleispiirteenä termokliini syvenee kesän mittaan ja samaan aikaan halokliini madaltuu. Matalimmillaan termokliini oli vuonna 2014, jolloin se oli vielä elokuun lopulla alle 15 m syvyydessä. Vuosina 2013 ja 2016 termokliini oli syvimmillään yli 30 metriä, vuonna 2013 20.7.–10.8. välisenä aikana ja 2016 20.8.–10.9. Halokliini oli syvimmillään vuoden 2015 kesän alussa, jolloin se oli 80 m syvyydessä. 2015 halokliinin madaltuminen kesän mittaan näkyy selvimmin, kun taas vuonna 2013, jolloin halokliini oli alussa matalin, noin 50 m, se jopa syveni 60 metriin syksyn alkuun. Halokliinin syveneminen vuonna 2013 on mielenkiintoista, sillä se ajautui tuolloin mittausjakson puolivälillä matalampaan veteen (kuva 5.2), jolloin halokliinin voisi olettaa madaltuvan (esim. Väli et al., (2013)). Vuonna 2016 taas poijun matalaan ajautuessa halokliini madaltui selkeästi. Vuosien välinen vaihtelu sekä halokliinin että termokliinin syvyyksissä oli suurinta alkukesästä ja pieneni syksyä kohti.

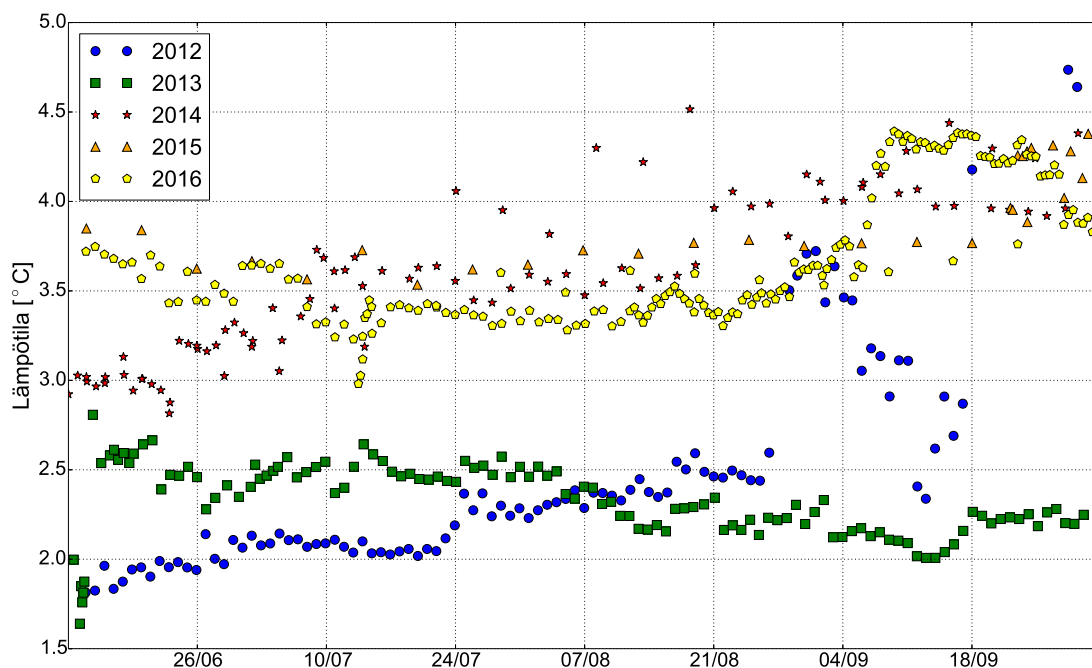
Halokliinin yläpuolisen kerroksen eli pintakerroksen keskilämpötila kesän mittaan kasvoi kaikkina vertailuvuosina syyskuun alkuun, paitsi 2013, jolloin lämpeneminen pysähtyi jo heinäkuun lopulla 8 °C:seen. Vuonna 2012 lämpeneminen pysähtyi elokuun alussa, mutta jatkui uudestaan syyskuun alussa (kuva 5.7). Samana vuonna lämpötila myös vaihteli äkisti jopa 5 °C muutamassa päivässä. Sekä uusi lämpeneminen syyskuussa että äkilliset heilahtelut johtuvat todennäköisesti poijun ajelehtimisesta erilaiseen vesimassaan ja matalampaan veteen. Lämpimin koko pintakerros oli syyskuun 2014 ja 2016 alussa, jolloin keskilämpötila ylitti 10 °C. Vuoden 2014 elokuussa näkyvä yksittäinen yli 11 °C:n pintakerroksen lämpötila johtui lasketun halokliinin syvyyden äkillisestä heilahduksesta, eikä äkillisestä lämpenemisestä.

Myös pohjakerroksen eli halokliinin alapuolinen vesimassa lämpeni koko vertailujakson ajan kaikkina muina vuosina, paitsi 2013 (kuva 5.8). Lisäksi vuodet 2014–2016 olivat selkeästi lämpimämpiä, kuin 2012 ja 2013. 2012 kesän alussa pohjakerroksen lämpötila oli vain noin 2 °C, eli 2 °C kylmempää, kuin 2014. Kesän 2013 lopulla taas lämpötila oli laskenut 2,25 °C:een, kun 2014–2016 se oli noin 4–4.5 °C. 2012 syyskuun alussa näkyy hyvin äkillinen lämpeneminen, mikä luultavasti johtuu poijun ajautumisesta mataliin vesiin, missä pohjakerroksen paksuus on erilainen, kuin Selkämeren syvillä alueilla.

Pintakerroksen keskimääräinen suolaisuus eri vuosina (kuva 5.9) seuraa sa-

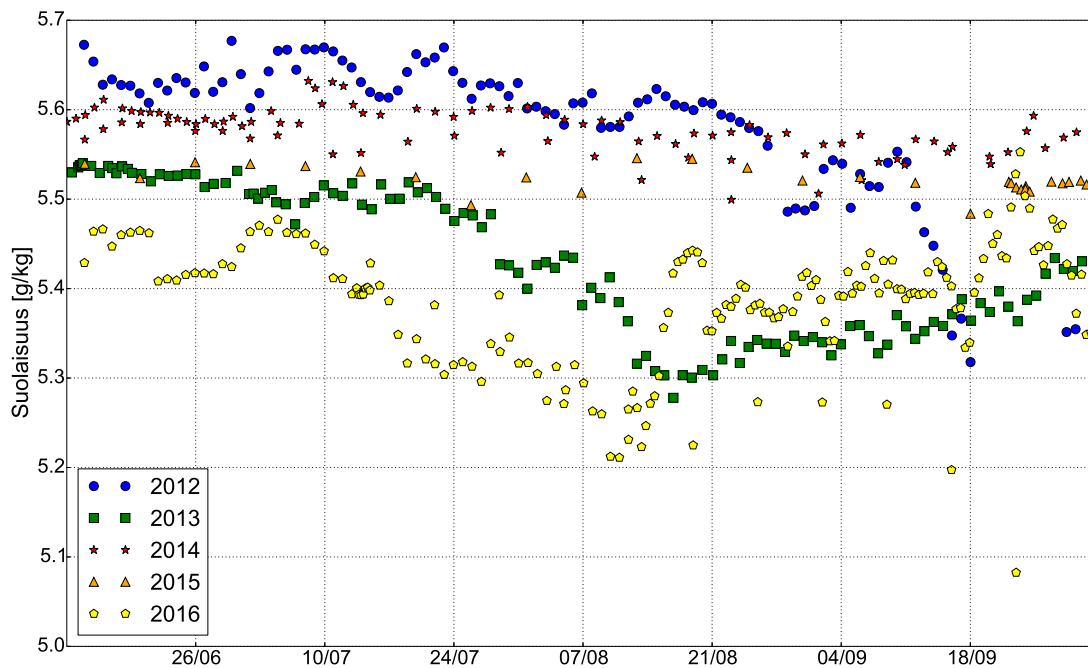


Kuva 5.7: Selkämeren pintakerroksen keskilämpötila vuosina 2012–2016.

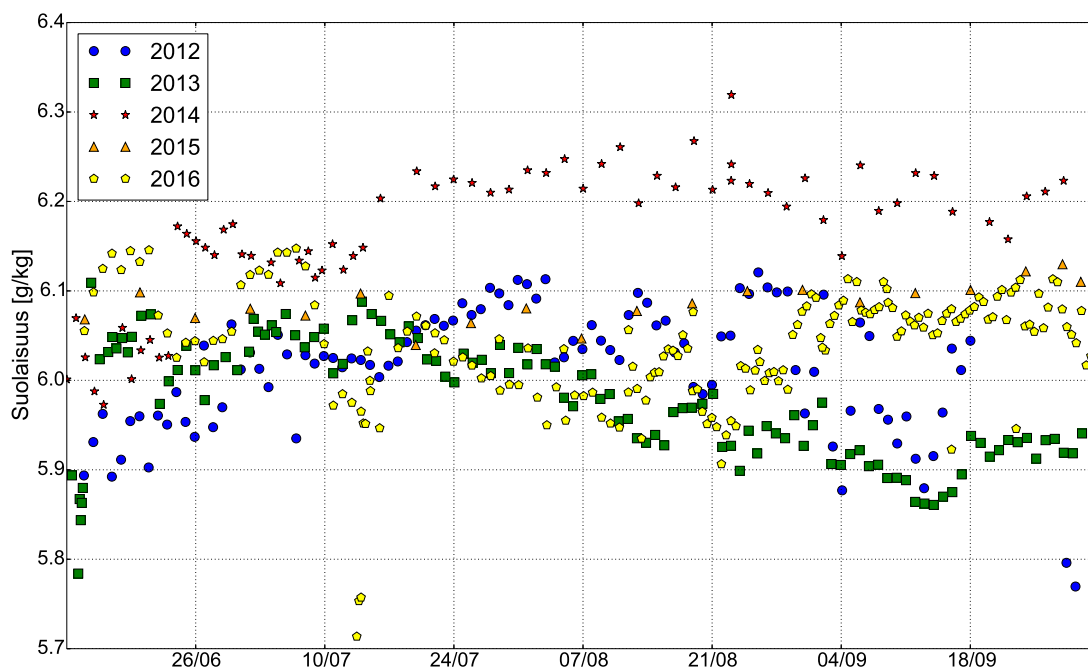


Kuva 5.8: Selkämeren pohjakerroksen keskilämpötila vuosina 2012–2016.

mankaltaista kaavaa kuin pintasuolaisuus (kuva 5.6), mutta muutosten amplitudi on pienempi. Vuoden 2016 elokuussa pintakerroksen suolaisuus kävi matalimmassa lukemassa, noin $5,2 \text{ g kg}^{-1}$, ja palautui lähelle kesän alun arvoa, $5,4\text{--}5,5 \text{ g kg}^{-1}$. Ke-



Kuva 5.9: Selkämeren pintakerroksen keski­suolaisuus vuosina 2012–2016.



Kuva 5.10: Selkämeren pohjakerroksen keski­suolaisuus vuosina 2012–2016.

sän 2013 pintakerroksen suolaisuuden kehitys oli samankaltainen, kuin 2016, mutta suolaisuuden pudotus oli pienempi. 2012, 2014 ja 2015 pintakerroksen suolaisuus pysyi melko tasaisena $5,5\text{--}5,6\text{ g kg}^{-1}$ välillä. Suurin pintakerroksen suolaisuus oli vuo-

den 2012 kesäkuussa, lähes $5,7 \text{ g kg}^{-1}$. Tuolloin poiju ajelehti lähellä Selkämeren ja Ahvenanmeren välistä kynnystä, missä suolaisuudessa näkyy varsinaisen Itämeren vaikutus. Kesän 2012 lopussa taas suolaisuus laski äkisti samaan aikaan lämpötilan äkillisen nousun kanssa (katso kuva 5.7), mikä viittaa poijun matalaan veteen ajelehtimisen olevan muutoksen syynä.

Halokliinin alapuolisen pohjakerroksen keskimääräisessä suolaisuudessa ei ole nähtävissä selkeää trendiä, paitsi 2013, jolloin suolaisuus laski yli $6,1 \text{ g kg}^{-1}$:sta noin $5,9 \text{ g kg}^{-1}$:ään. Korkein pohjakerroksen suolaisuus oli kesällä 2014, jolloin se ylitti $6,3 \text{ g kg}^{-1}$ elokuun loppupuolella. Vuonna 2014 pohjakerroksen suolaisuus oli ylipäänsä muita vuosia selkeästi korkeampi, keskimäärin $6,10 \text{ g kg}^{-1}$. Kesän 2012 lopulla myös pohjasuolaisuus laski äkisti pintakerroksen suolaisuuden tapaan, mikä viittaa ajelehtimiseen matalaan veteen.

Vuoden 2014 pohjakerroksen verrattain korkea suolaisuus johtuu mahdollisesti vallinneista poikkeuksellisista tuulista, jotka ovat mahdollisesti työntäneet varsinaiselta Itämereltä Ahvenanmeren kautta suolaisempaa vettä halokliinin alle. Utön sääaseman havainnoissa näkyy 2014 vertailuvuosia enemmän itätuulia ja Märketin sääasemalla tavallista enemmän idän ja koillisen välisiä tuulia, mitkä tukevat teoriaa. Toisaalta vuosina 2014–2015 aktiivisen mittausjakson 6902017 profiilit olivat vertailuvuosista syvimpiä (kuva 5.2), jolloin niissä todennäköisesti näkyy myös suolaisempaa vettä. Saman mittausjakson aikanakin näkyy kuitenkin selvä ero vuosien 2014 ja 2015 pohjakerroksen suolaisuudessa. Poijun ajelehtimisreitillä on mahdollisesti vaikutusta, mutta todennäköisesti suolaisuuden muutos johtuu vesimassan muutoksesta, sillä poijun ajelehtimisalue ei poikennut merkittävästi muiden vuosien reitistä. Pohjan läheltä mitattujen suolaisuuden arvojen perusteella heinäkuussa 2014 näkyi $0,1 \text{ g kg}^{-1}$ verrattain nopea nousu ja suolaisuus pysyi korkealla tammikuulle 2015 asti, jolloin se alkoi taas laskea. Kesää 2014 ennen poijut eivät mitanneet aivan pohjasta asti, joten kevään 2014 aikaisesta pohjan suolaisuuden kehityksestä ei ole Argo-poijudatan perusteella tietoa. CTD-luotauksissa seurantapiste SR5:ltä (kartta 2.1) näkyy 2013–14 joulutammikuulla noin $0,3 \text{ g kg}^{-1}$ muuta vertailukautta korkeampia suolaisuuden arvoja pohjan lähellä. Edellisen kerran vastaavia suolaisuuksia oli SR5:llä vuonna 2011. Piste on vuoden 2014 Argo-poijujen ajelehtimisaluetta etelämpänä, joten voi olla, että suolainen vesimassa on kulkeutunut pohjoisemmaksi kesään mennessä. Poijujen ajelehtimisesta arvioitujen virtausnopeuksien perusteella (kappale 5.4) SR5:ltä keskeiselle Selkämerelle kulkeutuminen kestäisi noin 1–2 kuukautta. Toinen mahdollinen selitys pohjakerroksen korkealle suolaisuudelle löytyy vesipatsaan erilaisesta kerrostuneisuudesta. Vuonna 2014 Selkämeren pintalämpötila oli tavallista korkeampi ja termokliini voimakas (kuvat 5.4 ja 5.5), mikä saattoi vähentää

makeamman veden sekoittumista alapuolisene vesimassaan. Myös pintakerroksen suolaisuus pysyi 2014 tasaisen korkealla, eikä merkkejä makean veden advektiosta näkynyt (5.6). Halokliinin syvyys ei poikennut vertailuvuosista.

Taulukko 5.3: Halokliinin ja termokliinin syvyydet, sekä keskimääräiset-, maksimi- ja minimi lämpötilat ja -suolaisuudet eri vuosien kesäkausina (13.6.-2.10.) halokliinin ylä- ja alapuolisessa pinta- ja syvän veden kerroksessa Argo-pojujen datasta laskettuna.

		2012	2013	2014	2015	2016	2012–2016
	Termokliini max [m]	26	30	24	22	32	32
	Halokliini mean [m]	57	55	64	64	53	57
	Halokliini max [m]	66	62	70	80	66	80
	Halokliini min [m]	44	44	46	50	44	44
	SST_{max} [°C]	18,6	16,9	22,7	18,5	19,3	22,7
Pintakerros	\bar{T} [°C]	6,8	6,6	7,2	8,0	8,1	7,3
	T_{max} [°C]	9,9	8,6	11,5	9,9	10,4	11,5
	T_{min} [°C]	4,5	4,1	4,6	5,0	5,1	4,1
	\bar{S} [g/kg]	5,46	5,43	5,56	5,52	5,46	5,49
	S_{max} [g/kg]	5,68	5,54	5,63	5,55	5,55	5,68
	S_{min} [g/kg]	5,32	5,28	5,50	5,48	5,08	5,08
Syvä vesi	\bar{T} [°C]	2,6	2,3	3,7	3,7	3,5	3,2
	T_{max} [°C]	4,7	2,8	4,5	4,4	4,4	4,7
	T_{min} [°C]	1,8	1,6	2,8	3,5	3,0	1,6
	\bar{S} [g/kg]	5,89	5,98	6,10	6,09	6,06	6,02
	S_{max} [g/kg]	6,10	6,11	6,32	6,20	6,15	6,32
	S_{min} [g/kg]	5,77	5,78	5,97	5,78	5,71	5,71

Termokliinin maksimisyydydet on otettu heinä-elokuulta. Tällöin kesän alun heikot helposti sekoittuvat kerrostumiset ja syysmyrkyjen syventämä termokliini jäävät huomiotta. Termokliinin ja halokliinin syvyyden määrittystapa on esitelty kappaleessa 4.6. SST_{max} on pintalämpötilan maksimi vertailujaksolla. Viivat lämpötilan T ja suolaisuuden S päällä merkitsevät keskiarvoa.

Argo-pojujen datasta lasketut lämpötilan ja suolaisuuden keskimääräiset arvot (taulukko 5.3) sopivat pintakerroksessa kirjallisuudessa esitettyihin rajoihin (kappale 2.2) ja lämpötilalle myös pohjakerroksessa. Pohjakerroksen lasketut suolaisuudet jäivät kuitenkin kirjallisuudessa esitettyä alhaisemmiksi. Tähän on todennäköisesti syynä se, etteivät Argo-pojujen profilit yltäneet aivan pohjaan, jolloin suolaisin vesi jäi mittaamatta. Selkämeren useimmiten vierailtu seurantapiste SR5 (katso kuva 2.1) sijaitsee Argo-pojujen ajalehtimisalueesta etelään, mikä osaltaan selittää korkeamman suolaisuuden. Voi myös olla, että kirjallisuuden keskiarvoissa suolaisuus on korkeampi, sillä 1970–80 luvun taitteessa Selkämeren pohjan suolaisuus oli koholla useita vuosia, mikä voi vaikuttaa pitkän ajan keskiarvoon. Neljän vuoden Argo-pojujen mittauksista klimatologisen keskiarvon ottaminen ei vielä onnistu.

5.4 Ajelehtimisnopeudet

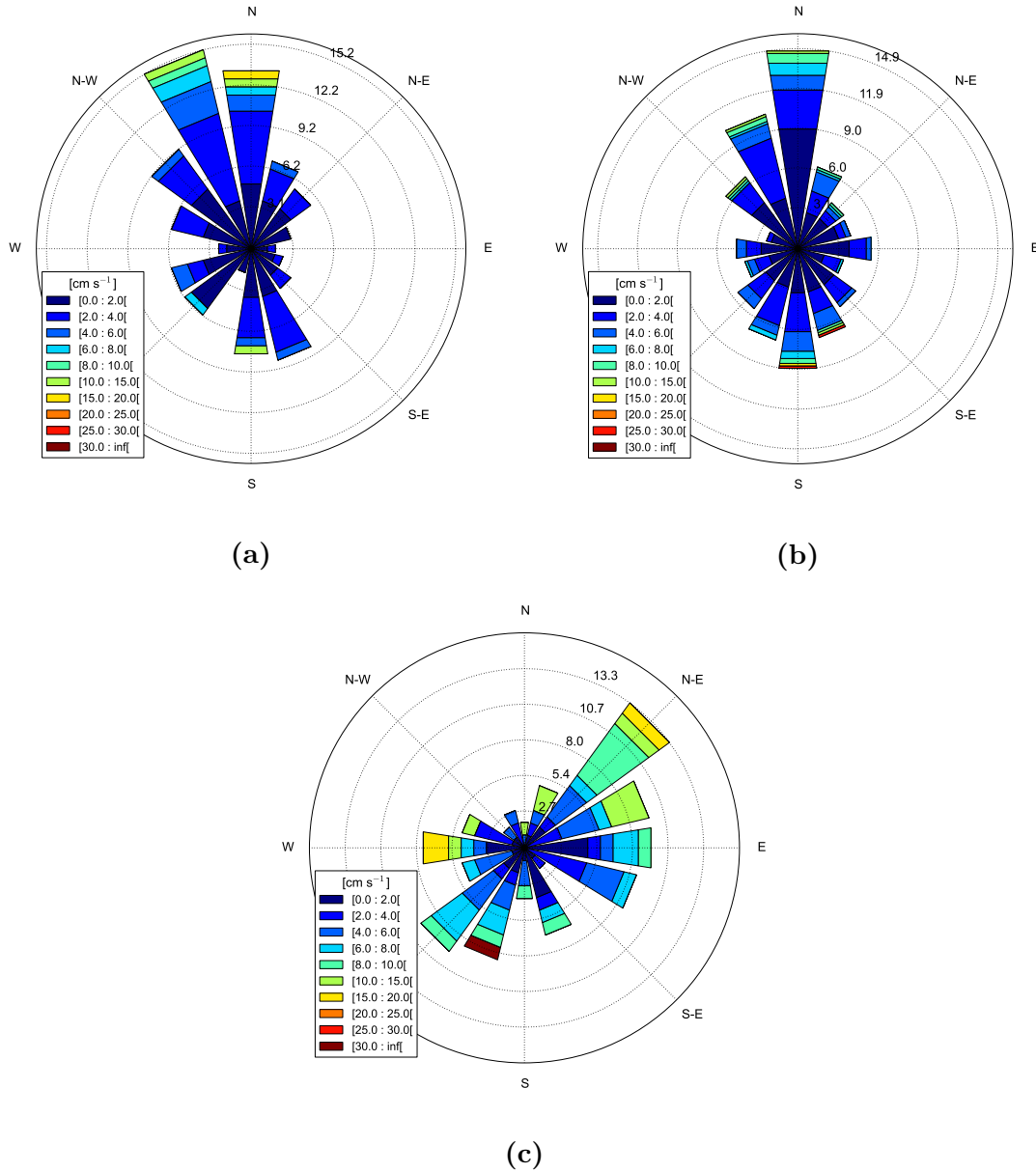
Poijujen eri mittausjaksojen profiilien aikavälit sekä keskimääräiset- ja maksimi ajelehtimisnopeudet on esitetty taulukossa 5.4. Keskimääräiset ajelehtimisnopeudet olivat välillä $1,4\text{--}4,8\text{ cm s}^{-1}$ ja suurin mitattu nopeus oli $30,2\text{ cm s}^{-1}$. Suurimmat mitatut nopeudet ovat vuoden 2012 mittausjaksolta (WMO 6901901), jolloin poiju ajelehti suuren osan ajasta melko matalassa vedessä ja maksiminopeus $30,2\text{ cm s}^{-1}$ on mittausjakson loppuvaiheesta syvänteen rinteeltä. Poijujen ajelehtimisnopeudet on esitetty suuntien kanssa Selkämeren etelä-, keski- ja pohjoisosissa kuvassa 5.11. Ajelehtimissuunnat seuraavat syvänteen muotoa siten, että leveysasteen $61,2^\circ\text{N}$ eteläpuolella virtaukset ovat lounais-koilliset-suuntaisia, leveysasteiden $61,2^\circ\text{N}$ ja 62°N välisellä alueella etelä-pohjois-suuntaisia ja leveysasteen $61,2^\circ\text{N}$ pohjoispuolella enimmäkseen luoteeseen. Altaan eteläosassa mitatut nopeudet ovat suurimpia. Tältä alueelta on vain yhden poijun mittauksia ja suuremmat nopeudet johtuivat siitä, että poiju ajelehti muita matalammassa vedessä.

Taulukko 5.4: Argo-pojujen profiilimittausten aikavälit ja ajelehtimisnopeudet Selkämerellä vuosina 2012-2016.

WMO-numero	Profiilien aikaväli [päivää]	Keskimääräinen ajelehtimisnopeus [cm s^{-1}]	Maksimi-nopeus [m s^{-1}]	Aikavälin ja ajelehtimisnopeuden korrelaatio
6901901	1	4,8	30,2	-0.253
6902013	1	2,8	9,8	-0.162
6902017	2-6	2,1	8,0	-0.442
6902022	0,5-1	1,4	9,0	0.171
6902023	7	2,6	5,3	-0.574

Aikavälin ja ajelehtimisnopeuden välille lasketut korrelaatiokertoimet ovat Pearsonin korrelaatiokertoimia.

Nopeudet on laskettu suoraan profiilien välisen etäisyyden ja profiilien aikavälin jakolaskuna. Poijun oletetaan ajelehtivan ympäröivän vesimassan virtausten mukana. Metodi sisältää monia virhelähteitä, sillä poiju lähettää koordinaattinsa vain kerran mittausyhteyksissä juuri ennen sukeltamista (katso kappale 3.1). Yhden syklin ajelehtimisnopeuteen sisältyy siis ajelehtimissyvyyden lisäksi myös nousun ja laskun aikainen liike sekä ajelehtiminen pinnalla. Nousun ja laskun aikana lopulliseen mitattuun virtaukseen vaikuttaa virtausnopeuden horisontaalimuutos, ja pinnalla pintavirtauksen lisäksi tuuli, aallokko ja inertiaoskillaatio. Lisäksi koko mittausyhteyksien kokonaisajelehtimiseen vaikuttaa virtauksen pyörteet (Katsumata ja Yoshinari, 2010). Virtauksen vertikaalimuutoksen aiheuttamaa virhettä ajelehtimissyvyyden virtaukseen voidaan arvioida yksinkertaisella mallilla, kun tiedetään poijun



Kuva 5.11: Argo-pojujen ajelehtimissuunnat- ja nopeudet Selkämerellä a) leveyspiirin 62 °N pohjoispuolella, b) leveyspiirien 61,2 °N ja 62 °N välissä ja c) leveyspiirin 61,2 °N eteläpuolella.

vertikaaliliikkeen kesto (Lebedev et al., 2007). Pinta-ajelehtimisen arvioiminen on kuitenkin hankalaa vain yhdellä koordinaattipisteellä ja tuulen ja aaltojen yhteisvaikutus voivat muuttaa poijun suuntaa pintavirtaukseen nähden. Lisäksi inertiaoskillaatio voi muuttaa poijun reittiä, joskin Selkämerellä inertiaoskillaation periodi on noin 13,6 tuntia (61,5 °N) eli puolen tunnin pinnalla olon aikana poijun suunta ei ehdi kääntymään paljoa. Ichikawa et al., (2001) tutkivat satelliittipaikannuksen aiheuttamaa virhettä laskettuihin ajelehtimisnopeuksiin, mutta nykyisten APEX-pojujen GPS-paikannus on niin tarkka, että ero todellisten ja mitettujen matkojen

välillä on vain kymmeniä metrejä (Simo Siiriä, henkilökohtainen tiedonanto).

Mittaus syklin osien suhteelliseen merkittävyyteen vaikuttaa profiilien aikaväli; mitä lyhyempi profiiliväli, sitä pienempi osa kuluneesta ajasta on vietetty ajelehtimissyvytydessä. Yhteen mittaus sykliin kulunut aika voidaan kirjoittaa

$$t_{sykli} = 2 * t_{vert} + t_{syvä} + t_{pinta}, \quad (5.1)$$

missä t_{vert} on poijun sukelluksen pinnasta ajelehtimissyvytyteen ja pintaan nousun kesto, $t_{syvä}$ on poijun ajelehtimissyvytydessä viettämä aika ja t_{pinta} pinnalla olon aika. Tietynpituiselle profiilivälille lasketun ajelehtimisnopeuden kuvaavuutta ajelehtimissyvytyden virtauksille voidaan arvioida tarkastelemalla ajelehtimisajan ja koko syklin pituuden suhdetta. Itämeren olosuhteissa $t_{vert} = 20\text{-}30$ min ajelehtimissyvytydestä riippuen ja $t_{pinta} = 30\text{-}60$ min kun satelliittiyhteys toimii normaalisti. Näillä reunaehdoilla lyhin mielekäs profiiliväli, jolla saadaan poijun syvällä ajelehtimisajaksi esimerkiksi vähintään 90 % on 11,6-20 tuntia. Tämän tutkielman laskuissa ei ole huomioitu niiden profiilien välisiä nopeuksia, joiden aikaväli oli alle 0,2 päivää (noin 5 tuntia). Tällaisia aikavälejä oli lähinnä mittausjaksojen alussa ja lopussa tai poijun ajelehtiessä matalassa vedessä, kun poijulle on annettava ohjeita tiuhaan. Näissä tilanteissa jopa kolmasosa mittaus syklistä oli muuta kuin syvällä ajelehtimistä.

Profiilien aikaväli vaikuttaa myös siihen, miten lyhytaikaiset muutokset datassa näkyvät. Tiedossa on vain alku- ja loppupiste, mutta näiden välinen kuljettu polku on tuntematon. Lopputulos on siis keskimääräinen nettovirtaus, eikä hetkellisistä nopeuksista saada tietoa. Taulukkoon 5.4 on laskettu profiilien aikavälin ja ajelehtimisnopeuden väliset korrelaatiokertoimet. Kaikilla mittausjakoilla, paitsi kesällä 2016 (WMO 6902022) korrelaatio on negatiivinen. Kesän 2016 lopulla poijua ajettiin tahallaan pohjaan profiilien välillä ja profiilien aikaväli pidettiin lyhyenä, jotta sille voitaisiin antaa käskyjä tiheämpään eikä se ajautuisi matalaan veteen. Nopeudet olivat lyhyellä profiilivälillä ja pohjassa ollessa odotetusti pieniä. Vuoden ympäri 2015-2016 mitannut poiju (WMO 6902017) keräsi pisimmän aikasarjan ja sillä käytettiin useaa eri profiiliväliä, joten se antaa luultavasti parhaan kuvan profiilivälin ja nopeuksien suhteesta. Tällä mittausjaksolla korrelaatio oli -0,442. Koko 2012-2016 datasetin profiilivälin ja ajelehtimisnopeuden korrelaatio on -0,126. Tuloksien perusteella poijujen avulla lasketuista virtausnopeuksista jää sitä enemmän todellista liikettä tallentamatta, mitä pidempi profiiliväli on. Toisaalta syvällä virtausnopeudet ovat myös pienempiä, joten kun syvällä ajelehtimisen osuus mittaus syklistä kasvaa, korrelaation voi odottaakin olevan negatiivinen. Näiden tekijöiden vaikutuksien tarkempi arviointi ei tämän työn puitteissa ole mahdollista, mutta asiaan on tärkeää perehtyä virtausnopeuksia laskettaessa. Virtausnopeuksien muutosten tarkkailussa

olisikin tärkeää verrata toisiinsa vain samalla profiilivälillä mitattuja ajelehtimisnopeuksia. Lisäksi Argo poijun sukellusparametrejä mietittäessä on päätettävä, minkä aikaskaalan virtauksien vaihteluita poijun avulla on tarpeellista erottaa. Virtausten mittaaminen ei kuitenkaan ole yleensä Argo-poijujen pääasiallinen tarkoitus, joten profiilivälin asettamisessa etusijalla on hydrografian seuranta. Lasketut ajelehtimisnopeudet ovat kiinnostava lisä, joka saadaan profiilimittausten ohessa, mutta ne ovat karkeita arvioita varsinkin Itämerellä, missä poijut ajelehtivat lähellä pohjaa ja osuvatkin siihen usein (kuva 5.2)

Argo-poijujen mittaussyklin osien aiheuttamia virheitä laskettuun virtausnopeuteen on tutkittu valtamerillä. Merkittävimpiä virhelähteitä ovat virtausnopeuden muutos vertikaalisuunnassa, tuntematon pinta-ajelehtiminen ja inertiaoskillatio sekä mahdolliset pyörteet asemien välillä. Itämerellä on otettava huomioon myös poijun pohjaan osumisen vaikutukset ajelehtimiseen. Lebedev et al., (2007) muodosti yksinkertaisen mallin virtausnopeuden vertikaalimuutoksen aiheuttaman virheen arvioimiseksi. Malli ei kuitenkaan toimi sellaisenaan Itämerellä käytettävien APEX-poijujen kanssa, koska malli olettaa poijun lähettävän paikkatiedon sekä poijun tullessa pintaan että ennen sukellusta. Myös Lebedev et al., (2007) esittämä malli pintavirtauksen ja sen virheen arvioimiseen tarvitsee usean mitatun paikan. Itämerellä virtausnopeuden vertikaalimuutosta ja pinta-ajelehtimistä on mahdollista arvioida merimallien tuottamien virtausten ja tuulidatan avulla, sillä pinnalla sekä nousussa ja laskussa kulunut aika saadaan poijujen mittaaman painedatan aikaleimoista. Näiden virheiden analysointi vaatii kuitenkin tarkkaa perehtymistä ja myös merimallien ja tuulidatan epävarmiiden arviointia, mikä ei tämän tutkielman puitteissa ole mahdollista.

5.5 Argo-poijut osana Selkämeren seurantaa

Argo-poijujen käyttö Selkämerellä ja muualla Itämerellä on onnistunut merialueen mataluudesta ja monimutkaisuudesta huolimatta hyvin. Poijut osuvat pohjaan usein, mutta toistaiseksi tämä ei ole haitannut profiilimittauksia. Yhtään poijuista ei ole menetetty, vaan kaikki on saatu haettua mereltä huoltoon. Mitattuja profiileja on kertynyt viiden vuoden aikana lähes tuhat, eli noin sata profiilia enemmän, kuin kailta Selkämeren seurantapisteiltä (4.4) samana aikana yhteensä. Suuri osa seuranta-asemista on lisäksi matalissa vesissä syvännealueen ulkopuolella, joten Argo-poijen lähes itsenäisesti tuottama seuranta-aineisto on yli 80 % Selkämeren syvillä alueilla mitatuista profiileista. Tavanomaisilla tutkimusaluksilla seurantaa tehdään noin 4 kertaa vuodessa, jolloin kaikki vuosien välistä vaihtelua lyhytaikaisempi muutos

jää huomaamatta. Esimerkiksi seurantapiste SR5:llä on vuosina 2012–2016 mitattu vain 20 profilia. Tiheän operatiivisen seurannan lisäksi Argo-poijujen profiloituvuutta voidaan muuttaa esimerkiksi kiinnostavan sääilmiön lähestyessä, ja poijut voivat tehdä mittauksia kovassakin merenkäynnissä, toisin kuin tutkimusalukset. Argo-poijut tuovat siis mittaustiheydellään erinomaisen lisän olemassa olevaan mittausrakenteeseen.

Poijujen ohjattavuus vaikuttaa merkittävästi siihen, millaisia aikasarjoja poijuilla saadaan, ja ohjattavuus taas riippuu paljon käyttöalueen muodosta. Esimerkiksi Gotlannin syvänteellä poijut pysyvät hyvin pienen ja selväreunaisen syvänteiden sisällä. Vastaavia mahdollisia 'ankkurointipaikkoja' ovat Itämerellä esimerkiksi Landsortin syvänteen varsinaisella Itämerellä, sekä Ulvön syvänteen Selkämerellä, joskin nämä syvänteet ovat Gotlannin syväntettä kapeampia ja poijujen pitäminen pienellä alueella saattaa olla haastavampaa. Ahvenanmeren syvät alueet ovat myös selvärajaisia ja niiden hydrografian seuranta olisi kiinnostavaa Selkämeren ja varsinaisen Itämeren vedenvaihdon tutkimuksen kannalta. Toisaalta esimerkiksi Suomenlahdella poijut eivät todennäköisesti pysy altaan avoimen päädyn takia. Kirjoitushetkellä Ilmatieteen laitoksella on poijuja käytössä Selkämerellä, Perämerellä ja Gotlannin syvänteellä. Selkämerelläkin poijut pysyvät yleensä syvillä alueilla, mutta poijujen liikkuvuus on syvän alueen koon takia paljon Gotlannin syväntettä suurempaa. Varsinaisella Itämerelläkin voisi Gotlannin syvänteen lisäksi olla vapaammin syvillä alueilla ajeltavia poijuja, joskin poijujen todennäköisiä ajelutrasseja ja jumitumispaikkoja olisi hyvä mallintaa etukäteen Itämeren keskimääräisten virtausten perusteella. Eteläisellä Itämerellä tätä testattiin vastikään (Walczowski et al., 2017).

Selkämeren kokoisella alueella poijuja tarvitaan useampi, jotta alueen hydrografiasta saataisiin parempi kokonaiskuva. Esimerkiksi kolme poijuja jaettuna tasaisin välimatkoin Selkämeren syvänteen alueelle etelästä pohjoiseen voisi olla sopiva määrä, jotta alueelliset erot suolaisuudessa tulisivat paremmin esiin. Poijuja voisi olla enemmän, mutta jokainen niistä vaatii jatkuvaa monitorointia ja kuljetuksen sekä noudon mereltä, joten liian montaa poijuja käyttäessä operointikustannukset kasvavat turhaan. Poijujen ajelutrasseista on vaikea ennustaa, joten poijujen jakaminen tietyille alueille on hankalaa. Jotkut poijuista ovat tähän mennessä pysyneet pitkiä aikoja lähes paikallaan, kun taas toiset ovat ajautuneet suoraan kohti pohjoista. Koska syvänteen virtaus näyttää olevan enimmäkseen etelä-pohjois-suuntaista, yksi vaihtoehto olisi poijujen lähettäminen syvänteen eteläosista, mistä ne todennäköisesti ajelutrasseivat yksitellen pohjoista kohti. Kirjoitushetkellä Selkämerellä on toiminnassa kolme poijuja, joista kaksi ovat ajelutrasseineet hyvin lähellä toisiaan poijujen

lähetyspaikan ympäristössä Selkämeren keskiosissa ja yksi kauempana pohjoisessa, minne se lähti ajelehtimaan heti lähetyksen jälkeen.

Kun Argo-profiilit yltävät pohjaan asti, koko vesipatsaan hydrografiaa pystytään seuraamaan jopa päivittäin. Näin saadaan tietoa lyhytaikaisista ilmiöistä, kuten myrskyjen aiheuttamasta sekoittumisesta, pintaa syvemmältä (esim. vuosien 2012 ja 2014 kovien tuulten jaksot, kappale 5.3.2), sekä voidaan seurata vesipatsaan tavallista vuodenaikaiskehitystä. Tähän mennessä tiheitä lämpötila-aikasarjoja on ollut saatavilla vain pintapoijuista. Ilmatieteen laitoksen tähän mennessä käyttämällä sensorimallilla Argo-poijujen profileista tosin jää juuri pintalämpötila pois. Selkämeren suolaisuuden ja lämpötilan, sekä erityisesti pohjan happitilanteen, ääriarvojen seuraamiseen Argo-poijujen tuoma hyöty riippuu poijujen paikasta ja liikkuvuudesta, sekä profiilien vertikaalisesta kattavuudesta. Muutosten seurannassa poijun paikalla on suuri merkitys. Mitä paremmaksi poijujen ohjaus kehittyy, sitä paremmin voidaan saada seurantapisteiden kaltaisia aikasarjoja. Eri poijujen profileista voi lisäksi etsiä toisiaan lähellä olevia profileja aikasarjojen muodostamiseksi, mikä tulee sitä helpommaksi, mitä pidempään ja useampia poijuja ehditään Selkämerellä operoida. Argo-poijujen vahvuus on kuitenkin lyhytaikaisten ilmiöiden seurannassa. Esimerkiksi myrskyjen aikana muutokset vesipatsaassa ovat nopeampia, kuin poijun ajelehtimisalueen muutoksesta johtuvat hydrografiassa havaitut muutokset. Argo-poijujen ajelehtimisesta voidaan arvioida myös ajelehtimissyvyyden virtauksia, mutta ne ovat ennemminkin hyödyllinen sivutuote, kuin poijujen pääkäyttötarkoitus. Poijut ovat nyt olleet käytössä Selkämerellä viisi vuotta, ja jatkuvia mittauksia on vuodesta 2014 alkaen. Niiden käyttö perinteisen laivamonitoroinnin aikaresoluution täydentäjänä antaa paremmat valmiudet nopeiden ilmiöiden seuraamiseen, mutta poijumittausten jatkuessa myös pitkäaikaisten vaihteluiden tarkastelu helpottuu.

6. Yhteenveto

Argo-poijuja on käytetty merentutkimuksessa 1990-luvulta lähtien, ja Ilmatieteen laitos on operoinut poijuja Itämerellä vuodesta 2011 alkaen. Poijujen kustannus-tehokas toimintaperiaate mahdollistaa kaukaistenkin merialueiden jatkuvan hydrografisen seurannan ilman tutkimusaluksia. Tässä tutkielmassa käytiin läpi Ilmatieteen laitoksen Argo-poijujen vuosien 2012–2016 data Selkämereltä. Poijujen ajelehtimisreittien perusteella arvioitiin ajelehtimissyvyyden virtauksia ja lämpötilan ja suolaisuuden profileita tarkasteltiin aikasarjana.

Ensin muodostettiin yleiskuva Selkämeren ominaisuuksista pelkän Argo-datan perusteella, minkä jälkeen vertailtiin hydrografiassa tapahtuvia muutoksia eri vuosina. Pintakerroksen lämpötila vaihteli kuukauden mukaan välillä $2,1\text{--}9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja pohjakerroksen välillä $3,2\text{--}4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Selkämeren keskimääräiseksi suolaisuudeksi pintakerroksessa saatiin $4,8\text{--}5,7\text{ g kg}^{-1}$ ja pohjakerroksessa $5,7\text{--}6,9\text{ g kg}^{-1}$. Pohjakerroksen suolaisuus oli kirjallisuudessa mainittua matalampi. Pinta- ja pohjakerroksen lämpötilat sopivat kirjallisuudessa esitettyihin. Selkämeren pohjassa ei havaittu happikatoa. Vuoden 2014 havaittiin olleen poikkeuksellinen etenkin pintalämpötilan ja pohjakerroksen suolaisuuden osalta. Tämän arveltiin johtuvan poikkeuksellisen lämpimästä säästä ja vallitsevien tuulten tavallista merkittävämmästä itäkomponentista, joka on mahdollisesti edesauttanut suolaisen veden virtaamista varsinaiselta Itämereltä Selkämerelle. Selkämeren syvänteen virtauksia arvioitiin Argo-poijujen ajelehtimisnopeuksien perusteella. Virtausnopeudet avomerellä olivat $1,4\text{--}4,8\text{ cm s}^{-1}$, mikä on lähellä kirjallisuudessa esitettyä $2\text{--}4\text{ cm s}^{-1}$.

Tulosten perusteella Argo-poijujen data antaa itsenäisenä datasettinä hyvän yleiskuvan Selkämeren tilasta. Tutkimusaluksilla suoritettavaa seurantaa huomattavasti tiheämpi profiliväli mahdollistaa lyhytaikaisten ilmiöiden, kuten tuulen aiheuttaman äkillisen sekoittumisen, helmpompaa havainnointia. Tämä uudenlainen data helpottaa esimerkiksi merimallien validointia huomattavasti. Poijujen ajelehtimisdatasta lasketut arviot ajelehtimissyvyyden virtausnopeudesta ovat myös erittäin hyödyllisiä, sillä virtausdataa on syvältä varsinkin keskeiseltä Selkämereltä vähän. Tosin lasketut ajelehtimisnopeudet ovat karkeita arvioita ja ne vaativat paljon

virhetarkastelua.

Argo-poijujen huomattiin osuvan pohjaan usein, mutta tähän mennessä Ilmatieteen laitos on onnistunut käyttämään samoja poijuja uudelleen huollon jälkeen, eikä yhtäkään poijuja ole vielä menetetty. Poijujen profiilien vertikaalinen kattavuus ja resoluutio ei ole yhtä hyvä kuin perinteisellä laivasta tehdyllä CTD-luotauksella, joten tarkempaa havainnointia etenkin pinnan tai pohjan läheltä tarvitsevaan tutkimukseen Argo-poijut eivät toistaiseksi riitä. Myöskään saman pisteen monitorointi, mikä on yksi hydrografian seurannan peruspilareista, ei ainakaan tämän tyyppin Argo-poijuilla onnistu. Itämerellä Argo-poijut tarvitsevat valtameriä enemmän monitorointia ja Itämeren topografia, kerrostuneisuus ja ajoittainen jääpeite aiheuttavat haasteita, mutta näiden haasteiden kanssa on opittu työskentelemään. Poijujen ajalehtimistä on opittu ohjaamaan pohjan muotojen avulla, mikä saattaa tulevaisuudessa mahdollistaa Selkämerelläkin esimerkiksi useamman 'paikallisen' Argo-poijun sarjan, joilla voitaisiin tutkia paremmin lyhytaikaisia paikallisia muutoksia, kuten kumpuamista, makean veden linssien kulkeutumista ja syvän veden muodostumista ja etenemistä Selkämerellä.

Tässä tutkielmassa Argo-poijujen sijainnin vaikutusta mittauksiin Selkämerellä käsiteltiin lähinnä kvalitatiivisesti hydrografian analyysissa. Poijujen paikan huomioon ottaminen ja linkittäminen esimerkiksi Selkämeren pitkäaikaisiin seurantapisteisiin antaisi mahdollisuuden perinteisen seurannan ja Argo-poijujen datan yhdistämiselle. Nyt kun jatkuva seuranta Argo-poijuilla on käynnissä Itämerellä, olisi kiinnostavaa valjastaa yksittäisiä poijuja tutkimushankkeisiin esimerkiksi tietyn kerroksen virtausten tutkimiseen tai hyvin lyhytaikaisten ilmiöiden seurantaan jatkuvalla profiloinnilla esimerkiksi myrskyjen aikana.

Kaiken kaikkiaan Argo-poijut ovat erinomainen lisä Selkämeren ja koko Itämeren seurantaverkkoon, ja poijujen lukumäärän ja ohjauskyvyn parantuessa niiden avulla tullaan tulevaisuudessa keräämään huomattava osa alueen fysikaalisesta profiilidatasta.

Kiitokset

Kiitoksia SmartSea-projektille työni rahoittamisesta (Suomen Akatemian strategisen tutkimuksen neuvoston rahoittama projekti, rahoituspäätös 292 985).

Tätä työtä ei olisi olemassa ilman ohjaajaani Laura Tuomea, joka otti minut jo kandidaatinvaiheessa harjoittelijaksi Ilmatieteen laitoksen Merentutkimusyksikköön. Laura on ollut paras mahdollinen ohjaaja, jonka kärsivällisyydestä ja omistautuneisuudesta on ollut suuri apu. Työskentely Operatiivisen oseanografian ryhmässä on ollut antoisaa oppimisen aikaa. Olen päässyt tutustumaan mahtaviin työtovereihini Simoon, Petraan, Teroon, Pekkaan, Kimmoon, Tuomoon ja moniin muihin, joista usealla on ollut tärkeä osansa tämänkin työn edistämisessä. Erityisesti haluan kiittää työ- ja opiskelutoveria Hediä, jonka tarjoama vertaistuki on ollut korvaamatonta.

Opiskeluvuodet Helsingin yliopistossa ovat olleet liioittelematta elämäni parasta aikaa. Jo ensimmäisenä päivänä yliopistolla tuutorini Katriina ja Olga ohjasivat hämmentynyttä ja nyt kiitollista fuksia geofysiikan kursseille, ja sillä tiellä ollaan. Samasta päivästä lähtien Pirita ja Kaiu ovat kulkeneet vierellä, kiitos heille vuosien ystävydestä ja tuesta. Kiitos myös rakkaille ainejärjestöille Geysirille ja Resonanssille, joiden parissa puuhaaminen on ollut sekä loistava vastapaino että tuki opiskelulle. Niiden kautta olen myös tavannut lukemattomia ihania ihmisiä, joita ilman elämä olisi paljon tylsempää. Myös Fysiikan laitos ansaitsee kiitoksen vaihto-opintojeni mahdollistamisesta Huippuvuorilla.

I am grateful for the motivation and perspective UNIS gave for my studies, and for all the amazing people I met and the experiences I got to share with them. Thank you Maria, Franziska, Adi, Sander and many others for your friendship in happy and difficult times. I am also forever grateful to Tobi for his companionship during the time I got to know him, and for teaching me what kindness and courage mean.

Suuri kiitos vanhemmilleni kaikesta tuesta ja kasvatuksesta, jonka avulla kasvan pikku hiljaa itsenäiseksi ihmiseksi ja tutkijaksi. Kiitos myös pikkusiskolleni Inarille maan päälle palautuksesta aina, kun meinaan luulla, etten olisi ihan tyhmä.

En tiedä miten voin kiittää Tomia tarpeeksi maailmani avartamisesta, huumorista, huolenpidosta ja kaikesta siitä kasvamisesta, joista olen viimeisten neljän ja puolen vuoden aikana päässyt osalliseksi.

Kirjallisuus

- Ambjörn, Cecilia, Barry Broman ja Carsten Peterson (1981): ”Bottniska viken - vattenutbytesprocesser. Vad är känt och vad saknas ännu?” Teoksessa: *Andra svensk-finska seminariet om Bottniska viken, Luleå, Sweden, June 16-17, 1981*. Toim. Hans Cederwall. Rapport / Naturvårdsverket 1618.
- BACC II kirjoittajat (2015): *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Regional Climate Studies. Springer International Publishing.
- Backer, Hermann ja Manuel Frias, toim. (2013): *Planning the Bothnian Sea – key findings of the Plan Bothnia project*. Digital edition. Helsinki: HELCOM.
- Bergström, Sten ja Bengt Carlsson (1994): ”River Runoff to the Baltic Sea: 1950-1990”. *Ambio* 23.4/5, s. 280–287.
- Carval, Thierry, Bob Keeley, Yasushi Takatsuki, Takashi Yoshida, Stephen Loch, Claudia Schmid, Roger Goldsmith, Annie Wong, Rebecca McCreddie, Ann Thresher ja Anh Tran (2015): *Argo User’s manual V3.2*. URL: <http://doi.org/10.13155/29825>.
- Conley, Daniel J., Svante Björck, Erik Bonsdorff, Jacob Carstensen, Georgia Destouni, Bo G. Gustafsson, Susanna Hietanen, Marloes Kortekaas, Harri Kuosa, H. E. Markus Meier, Baerbel Müller-Karulis, Kjell Nordberg, Alf Norkko, Gert-rud Nürnberg, Heikki Pitkänen, Nancy N. Rabalais, Rutger Rosenberg, Oleg P. Savchuk, Caroline P. Slomp, Maren Voss, Fredrik Wulff ja Lovisa Zillén (2009): ”Hypoxia-Related Processes in the Baltic Sea”. *Environmental Science & Technology* 43.10, s. 3412–3420.
- Ekman, F. L. ja O. Pettersson (1892): ”Den svenska hydrografiska expeditionen år 1877 under ledning af F. L. Ekman”. Teoksessa: vol. 25. Kongliga Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar 1. Kungl. boktryckeriet. P.A. Norstedt & Söner, s. 1–163.

- Fonselius, Stig (1996): *Västerhavets och Östersjöns oceanografi*. SMHI, Norrköping, s. 200.
- Green, J.A. Mattias, Bengt Liljebladh ja Anders Omstedt (2006): "Physical oceanography and water exchange in the Northern Kvarf Strait". *Continental Shelf Research* 26.6, s. 721–732.
- Hietala, Riikka, Peter Lundberg ja Jenny A.U. Nilsson (2007): "A note on the deep-water inflow to the Bothnian Sea". *Journal of Marine Systems* 68.1–2, s. 255–264.
- Håkansson, Bertil, Pekka Alenius ja Lars Brydsten (1996): "Physical Environment in the Gulf of Bothnia". *Ambio*, s. 5–12.
- Ichikawa, Yasuko, Yasushi Takatsuki, Keisuke Mizuno, Nobuyuki Shikama ja Kensuke Takeuchi (2001): *Estimation of drifting velocity and error at parking depth for the Argo float*. ARGO Technical Report. JAMSTEC, s. 68–77.
- IOC, SCOR ja IAPSO (2010): *The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties*. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides 56. UNESCO, s. 196.
- Johansson, Peter (2009): *Maan kohoaminen (Siteerauspäivä 17.10.2016)*. GTK. URL: <http://www.geofoorumi.fi/retkella/maakohoa.html>.
- Katsumata, Katsuro ja Hiroshi Yoshinari (2010): "Uncertainties in Global Mapping of Argo Drift Data at the Parking Level". *Journal of Oceanography* 66.4, s. 553–569.
- Lebedev, Konstantin V., Hiroshi Yoshinari, Nikolai A. Maximenko ja Peter W. Hacker (2007): *YoMaHa'07: Velocity data assessed from trajectories of Argo floats at parking level and at the sea surface*. IPRC Technical Note 4(2).
- Lehmann, Andreas ja Hans-Harald Hinrichsen (2000): "On the thermohaline variability of the Baltic Sea". *Journal of Marine Systems* 25.3–4, s. 333–357.
- Leppäranta, Matti ja Kai Myrberg (2009): *Physical Oceanography of the Baltic Sea*. 1. painos. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Marmefelt, Eleonor ja Anders Omstedt (1993): "Deep water properties in the Gulf of Bothnia". *Continental Shelf Research* 13.2, s. 169–187.
- McDougall, T. J. ja P. M. Barker (2011): *Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox*. SCOR/IAPSO WG127, s. 28.

- McDougall, T. J., D. R. Jackett, F. J. Millero, R. Pawlowicz ja P. M. Barker (2012): "A global algorithm for estimating Absolute Salinity". *Ocean Science* 8.6, s. 1123–1134.
- Meier, H. E. M. (2005): "Modeling the age of Baltic Seawater masses: Quantification and steady state sensitivity experiments". *Journal of Geophysical Research: Oceans* 110.C2.
- (2007): "Modeling the pathways and ages of inflowing salt- and freshwater in the Baltic Sea". *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74.4, s. 610–627.
- Meier, H. E. M., A. Höglund, K. Eilola ja E. Almroth-Rosell (2017): "Impact of accelerated future global mean sea level rise on hypoxia in the Baltic Sea". *Climate Dynamics* 49.1, s. 163–172.
- Moller, J. S. ja I. S. Hansen (1994): "Hydrographic processes and changes in the Baltic Sea". *Dana: A Journal of Fisheries and Marine Research* 10, s. 87–104.
- Myberg, Kai ja Oleg Andrejev (2006): "Modelling of the circulation, water exchange and water age properties of the Gulf of Bothnia". *Oceanologia* 48.S, s. 75–90.
- Mälkki, Pentti (1981): "Bottniska vikens hydrografi - en översiktsrapport". Teokses-sa: *Andra svensk-finska seminariet om Bottniska viken, Luleå, Sweden, June 16-17, 1981*. Toim. Hans Cederwall. Rapport / Naturvårdsverket 1618.
- Mälkki, Pentti ja Rein Tamsalu (1985): *Physical features of the Baltic Sea*. Finnish Marine Research 252. Merentutkimuslaitos.
- Pettersson, Otto ja Gustaf Ekman (1897): *De hydrografiska förändringarne inom Nordsjöns och Östersjöns område under tiden 1893-1897*. Vol. 29. Kongliga Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar 5. Kungl. boktryckeriet. P.A. Norstedt & Söner.
- Purokoski, Tero, Eemeli Aro ja Aleksi Nummelin (2013): "First Long-Term Deployment Of Argo Float in Baltic Sea". English. *Sea Technology* 54.10, s. 41–44.
- Raateoja, Mika (2013): "Deep-water oxygen conditions in the Bothnian Sea". *Boreal Environment Research* 18.3-4, s. 235–249.
- Roemmich, Dean, Gregory C. Johnson, Stephen Riser, Russ Davis, John Gilson, W. Brechner Owens, Silvia L. Garzoli, Claudia Schmid ja Mark Ignaszewski (2009): "The Argo Program: Observing the Global Ocean with Profiling Floats". *Oceanography* 22.

- Schlitzer, R. (2016): *Ocean Data View*. URL: <http://odv.awi.de>.
- Seifert, T., F. Tauber ja B. Kayser (2001): "A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea – 2nd edition". *Baltic Sea Science Congress, Stockholm 25-29. November 2001, Poster #147*.
- SMHI ja FIMR (1982): *An Ice Atlas for the Baltic Sea, Kattegat, Skagerrak and Lake Vänern*. Norrköping, Sjöfartsverket.
- The International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen (2014): *ICES Dataset on Ocean Hydrography*.
- Walczowski, W., I. Goszczko, P. Wieczorek, M. Merchel ja D. Rak (2017): "First measurements with Argo floats in the Southern Baltic Sea". Teoksessa: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. Vol. 19. EGU General Assembly Conference Abstracts, s. 10755.
- Westerlund, Antti ja Laura Tuomi (2016): "Vertical temperature dynamics in the Northern Baltic Sea based on 3D modelling and data from shallow-water Argo floats". *Journal of Marine Systems* 158, s. 34–44.
- Witting, Rolf J. (1905): *Översikt af De Bottniska sjöarnas hydrografi (öfvertryck ur meddelanden af Geografiska föreningen i Finland. VII. 1904-1905)*. Helsingfors centraltryckeri och bokbinderi aktiebolag, s. 98.
- Voipio, Aarno, toim. (1981): *The Baltic Sea*. Vol. 30. Elsevier Oceanography Series. Elsevier, s. 1–418.
- Väli, Germa, H. E. Markus Meier ja Jüri Elken (2013): "Simulated halocline variability in the Baltic Sea and its impact on hypoxia during 1961–2007". *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118.12, s. 6982–7000.
- Ærtebjerg, G., J. H. Andersen ja Hansen, toim. (2005): *Nutrients and Eutrophication in Danish Marine Waters - A Challenge for Science and Management*. Ministry of the Environment: Copenhagen, Denmark.